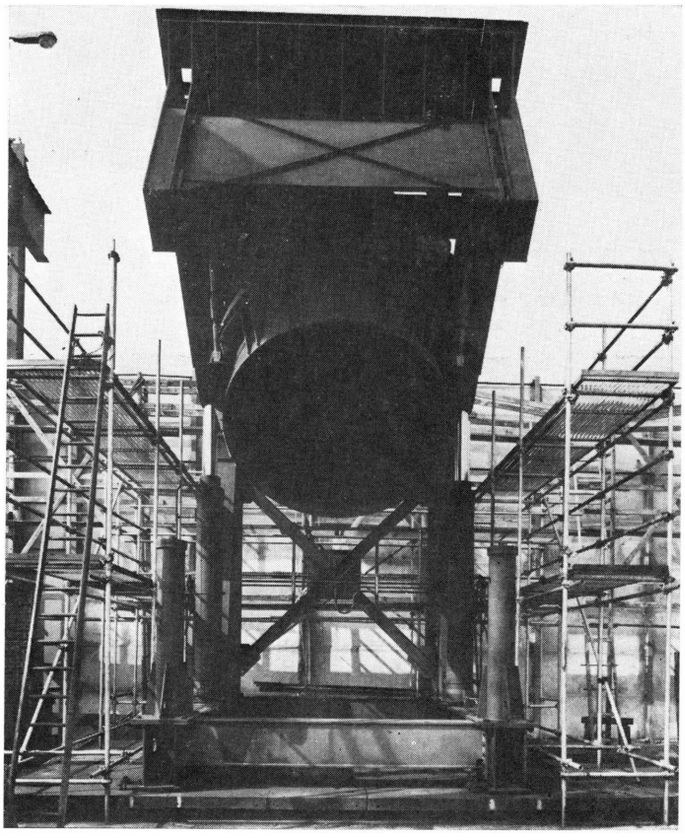
# ELEKTRIE

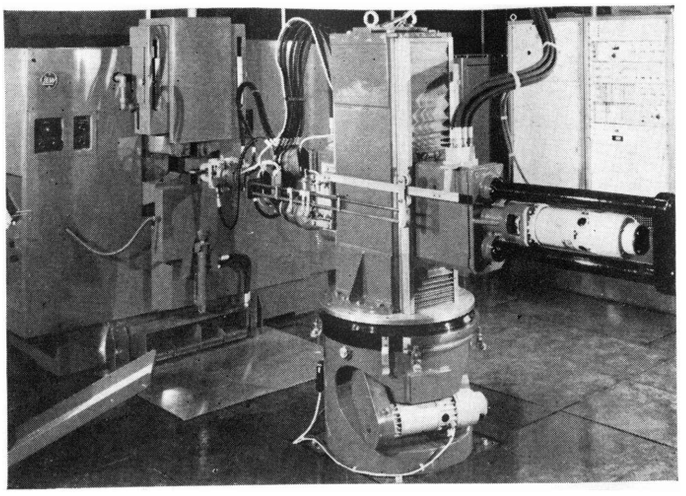
3|85

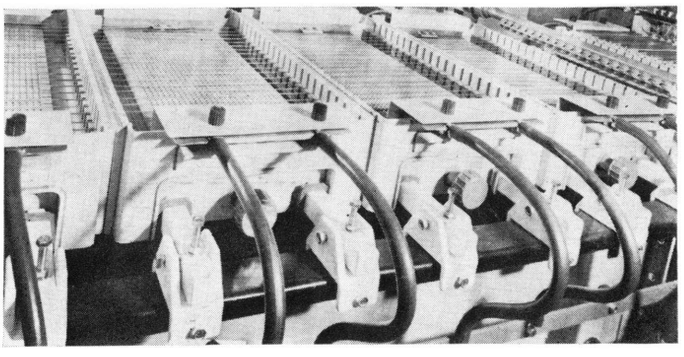
VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013–5399

## Ein Kupferfolienprogramm für den Export

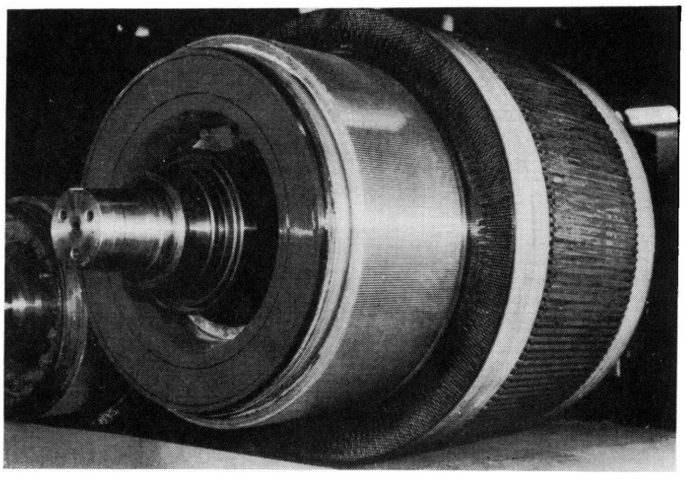
0120306







**Erzeugnisse des Kombinats VEB Lokomotivbau — Elektrotechnische Werke „Hans Beimler" Hennigsdorf**



Weitere Informationen dazu finden Sie in unserer Messevorschau auf den Seiten 111 und 112.

**Bild 1.** NF-Induktions-Tiegelschmelzofen für 25 Tonnen Gußeisen (Montage)

**Bild 2.** Abbrennstumpfschweißmaschine SU 63 E mit Mikroelektroniksteuerung

**Bild 3.** Drahtgalvanisierautomat DGA

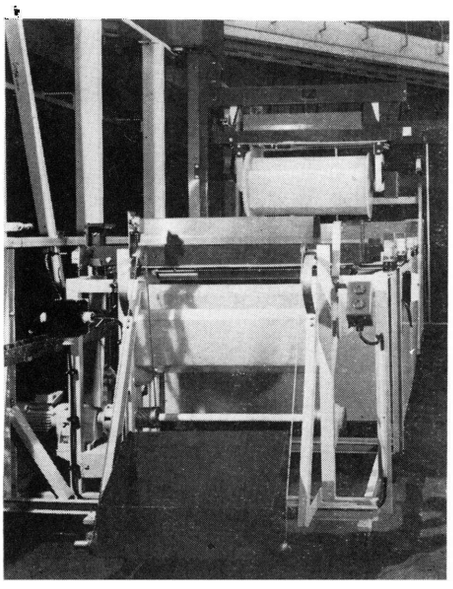
**Bild 4.** Automatische Galvanisiertrommelstraße ATS

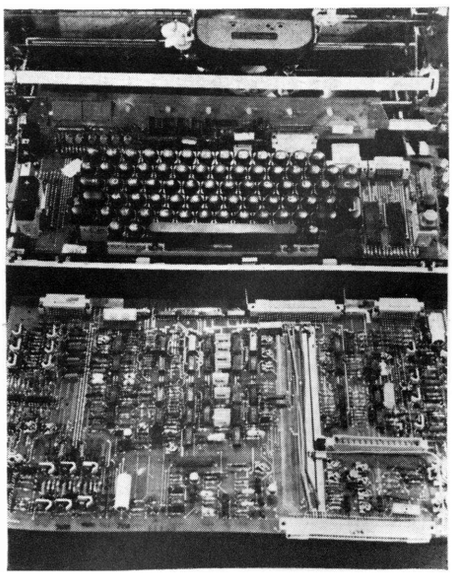
**Bild 5.** Einsatzbeispiel für Folienglimmertafeln K 1000-2 (Fahrmotor für Elektrolokomotive)

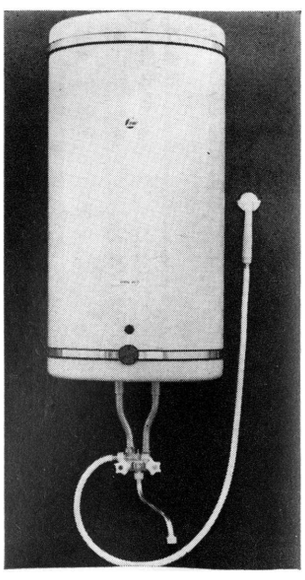
**Bild 6.** Kupferkaschierter LEW-Schichtpreßstoff als Leiterplatte für eine elektronische Schreibmaschine

**Bild 7.** Neuer LEW-Heißwasserspeicher aus dem Konsumgüterprogramm

Fotos: Werkfoto







3|85 ELEKTRIE

39. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013-5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Silberne Plakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. H.-J. Mau · Prof. Dr. phil. habil. G. Mierdel · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hanella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden · Dipl.-Ing. W. Knuth, Berlin

**Titelbild**

LEW-Kupferfolien sind hochwertiges Vormaterial für die Herstellung von Basismaterialien für gedruckte Schaltungen, die auch auf extrem dünnen Epoxidharz-Glasgewebe-Laminaten höchsten Ansprüchen genügen. Darüber hinaus fertigt das Kombinat VEB Lokomotivbau-Elektrotechnische Werke „Hans Beimler" Hennigsdorf (LEW) Anlagen für die Produktion und Nachbehandlung von Kupferfolien. Auf Basis des LEW-know-how sind bereits Fertigungsstätten für Kupferfolien in der UdSSR und in Indien aufgebaut worden.
Weitere wichtige Erzeugnisse des Kombinats werden in diesem Heft auf der 2. US sowie in unserer Messevorschau auf den Seiten 111 und 112 vorgestellt.

Foto: Werkfoto

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

## Inhaltsverzeichnis

Seite

**Aktuelle Information** 82

Müller, O.
**Struktur, Arbeitsweise und Ziele der CIGRE** 83

**Fachaufsätze**

Petzold, F.; Küllig, P.
**Zum Einfluß von Zusätzen auf das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen** 85

Petzold, F.; Schwarz, J.; Eberhardt, M.
**Einfluß der Diffusion von $SF_6$ auf die Kanaleinsatzzeit von Polyethylen- und Epoxidharz-Modellisolierungen** 88

Rothhardt, L.
**Rechenvorschriften für die elektrische Festigkeit heißer thermisch inhomogener Gasstrecken in $SF_6$** 90

Rönsch, H.; Bauch, H.
**Berechnung der Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion für Abnehmer in Elektroenergie-Verteilungsnetzen** 92

Winkler, T.
**Berechnung relevanter Zuverlässigkeitskenngrößen für die Übertragung von Netzschutzsignalen** 96

Höhne, E.; Kramer, K.
**Einfluß magnetischer Felder auf Stahlkonstruktionen** 101

Jahn, D.; Weber, H.
**Doppeltgeschirmter Aufbau einer Meßwertübertragungseinrichtung durch Modifizierung des EGS-Systems** 104

Fischer, F.; Retzlaff, W.
**Simulation von Schaltungen der Leistungselektronik mit Hilfe programmierbarer Kleinstrechner** 107

**Umschau**

**Erzeugnisse der Elektroindustrie der DDR — Vorschau zur Leipziger Frühjahrsmesse 1985 (Fortsetzung)** 111

**Diskussionsbeiträge der DDR-Teilnehmer während der 30. Session der CIGRE in Paris 1984** 115

**Zeitschriften** 117

**Bücher** 118

# AKTUELLE INFORMATION

## Polymere für Elektrotechnik/Elektronik (Mikroelektronik)

*1. Tagung mit internaionaler Beteiligung*

Zeit: 24. bis 26. September 1985
Ort: Berlin
Veranstalter: Zentralinstitut für Organische Chemie der AdW der DDR, Bereich Mikromolekulare Verbindungen; Chemische Gesellschaft der DDR, FV Mikromolekulare Chemie; FV Elektrotechnik

Die Tagung wird sich mit der Herstellung, Charakterisierung und Anwendung von Polymeren auf dem Gebiet der Elektrotechnik/Elektronik (Mikroelektronik) befassen und hierbei sowohl anwendungstechnische praxisbezogene als auch theoretische Aspekte beim Einsatz von Polymeren einschließen.

Inhaltliche Schwerpunkte

— Polymere als Elektroisolierstoffe
— Polymere mit besonderen Eigenschaften (Elektrisch leitfähige Polymere, Resists)
— Theoretische, methodische und verfahrenstechnische Probleme beim Einsatz von Polymeren in Elektrotechnik/Elektronik (Mikroelektronik)

Es ist Anliegen der Tagung. einen Überblick über neueste Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet zu geben und Probleme der Entwicklung von polymeren Werkstoffen für Elektrotechnik/Elektronik zu diskutieren.

**Anfragen**

Prof. Dr. sc. nat. *H. Frommelt*
Vorsitzender des wissenschaftlichen Vorbereitungskomitees
Dr. sc. nat. *J. Gähde*
Leiter des Organisationsbüros
1199 **Berlin**
Rudower Chaussee 5
H. Frommelt, Berlin EA 1929

## Rechnergesteuerte Antriebe — Rationalisierung durch Elektrotechnik/Elektronik/Mikroelektronik

*KDT-Fachtagung*

Zeit: 9. und 10. Oktober 1985
Ort: Suhl
Veranstalter: Bezirksverband Suhl

Inhaltliche Schwerpunkte

— gegenwärtig und zukünftig in der DDR verfügbare Hauptelemente der Antriebstechnik
— Konzepte verallgemeinbarer Antriebslösungen und Betriebserfahrungen
— neue theoretische Erkenntnisse und Methoden zur Analyse und Synthese von rechnergesteuerten Antrieben

**Rundtischgespräch**

Erkennbare Entwicklungstendenzen für Forschungsschwerpunkte und Schlußfolgerungen für die Aus- und Weiterbildung an den Hochschulen und im Rahmen der KDT

**Anfragen**

Einladung und Programme sind beim Bezirksvorstand der KDT Suhl anzufordern.
6000 **Suhl**
Straße der OdF 29
U. Hartung, Suhl EA 1940

## Starkstrombeeinflussung von Informationsanlagen, Systemverträglichkeit (EMC) von Mikroelektronik

*5. Fachtagung mit Beteiligung sozialistischer Länder*

Zeit: 10. und 11. Dezember 1985
Ort: Berlin
Veranstalter: Fachverband Nachrichtenwesen der Kammer der Technik

Inhaltliche Schwerpunkte

— Schutz der Elektronik/Mikroelektronik vor Überspannungen bei elektrischer Beeinflussung durch technische und natürliche Beeinflussungsquellen
— Bahnbeeinflussung und Schutzmaßnahmen
— Standardisierung, Normung, Grenzwerte

**Anfragen**

Sekretariat des Fachverbandes Nachrichtenwesen der Kammer der Technik im Hause des Institutes für Post- und Fernmeldewesen
1040 **Berlin**
Oranienburger Straße 70
M. Müller, Berlin EA 1939

## Mikrorechnergestützter Technologenarbeitsplatz MIKRO-TAP

*Lehrgang für Leitungskader; Fernkurs und Praktikum für Fachkader*

Die Teilnehmer werden zur sachgerechten Entscheidung bei der Auswahl prinzipieller Lösungen, zum Erkennen der Rationalisierungsschwerpunkte, zur sachkundigen Planung und Leitung der Einsatzvorbereitung von rechnergestützten Arbeitsplätzen und zur Abschätzung der Auswirkungen der Rationalisierungsmaßnahmen befähigt.

Inhaltliche Schwerpunkte

— Notwendigkeit und Ziel des Einsatzes rechnergestützter Arbeitsplätze — internationaler Stand — zentrale und dezentrale Lösungen — Dialogsysteme — Forderungen aus der Sicht der Fertigungsvorbereitung
— Grundlösung und prinzipielle Funktion eines rechnergestützten Arbeitsplatzes — Anforderungen — Dialogsystem und Ausarbeitung technologischer Unterlagen — Anforderungen an die Software
— Mikrorechentechnische Grundlagen — Programmierung eines Mikrorechners — Mikrorechner K 1510 und K 1520 — Bürocomputer A 5120 und A 5130 — Mikrorechnersystem 1600
— Grundsoftware und ihre Wirkungsweise beim rechnergestützten Technologenarbeitsplatz — Editor — Formelinterpreter — Fileverwalter — Dialogprogramme
— Aufbereitung technologisch-konstruktiver Sachverhalte zu technologischer Software — Einsatzvorbereitung — Algorithmierung technologischer Sachverhalte, Abläufe und Informationsverarbeitungsprozesse — mathematische Modellierung — statistische Versuchsplanung — experimentelle Optimierung — rechnergestützte Suche typbarer Prozeßabschnitte — rechnergestützte Ableitung technologischer Regeln und Gesetze

**Anfragen**

Anmeldungen und Delegierungen nehmen die zuständigen Bezirksvorstände der KDT entgegen.

Präsidium der KDT,
Sekretariatsbereich für Weiterbildung
EA 1941

## Rechnergestützter Arbeitsplatz für Projektierung RAP

*Lehrgang für Leitungskader; Fernkurs und Trainingskurs für Fachkader*

Durch den Aufbau Rechnergestützter Arbeitsplätze für die Projektierung von Fertigungsstätten (RAP) kann die Projektqualität bedeutend erhöht und der Projektierungsprozeß wesentlich beschleunigt werden.
Am RAP werden Kenntnisse über die Geräte-, Programm-, Daten- und Organisationsbasis vermittelt. Im Vordergrund steht die Demonstration und Übung der Dialogarbeitsweise in der Fachsprache des Projektanten, ohne daß der Teilnehmer sich selbst mit der Programmierung beschäftigen muß.

Inhaltliche Schwerpunkte

— Grundlagen der rechnergestützten Projektierung
— Programmierbare Kleinstrechner in der Projektierung (Arbeitsweise und praktische Übungen)
— Rechnergestützter Arbeitsplatz für Projektierung (Konfiguration und Funktion)
— Arbeitsweise und praktische Übungen
— Rechnergestützte Dimensionierung und Disposition am RAP (Praktika)
— Rechnergestützte Strukturierung und Layoutprojektierung am RAP (Praktika)

**Anfragen**

Anmeldungen und Delegierungen nehmen die zuständigen Bezirksvorstände der KDT entgegen.

Präsidium der KDT,
Sekretariatsbereich für Weiterbildung
EA 1942

# Struktur, Arbeitsweise und Ziele der CIGRE

Von

Prof. Dr.-Ing. Ottmar Müller,
Präsident des Nationalkomitees CIGRE der DDR,
Ordentlicher Professor an der Ingenieurhochschule Zittau

## 1. Was bedeutet CIGRE?

Die „Internationale Konferenz über große Hochspannungs-Energiesysteme" (CIGRE[1]) ist eine nach dem französischen Recht gegründete nichtstaatliche internationale Organisation. Der Sitz der Organisation und des Generalsekretariats ist in Paris.

Das Ziel der CIGRE ist die Förderung von technischen Erkenntnissen und der Austausch von Erfahrungen zwischen allen Ländern bezüglich der Erzeugung und Übertragung von Elektroenergie bei hohen Spannungen.

Der Gegenstand der CIGRE-Arbeit umfaßt die gesamte Technik der Hochspannungsausrüstungen angefangen von dem elektrotechnischen Teil der Kraftwerke, der Freileitungen, der Leistungskabel und der Umspannwerke bis zur Entwicklung, dem Aufbau und dem Betrieb von Elektroenergieübertragungssystemen. Dazu kommen Fragen des Schutzes dieser Systeme sowie der Beeinflussung anderer Systeme, insbesondere der Nachrichten-Übertragungsnetze.

Alle zwei Jahre — in den Jahren mit geraden Jahreszahlen — wird in Paris eine Session abgehalten. Auf dieser Session wird über alle Fragen, mit denen sich die CIGRE beschäftigt, diskutiert. Diese Diskussion erfolgt auf der Basis von technischen Berichten (papers), die nach einem bestimmten Schlüssel auf die Länder mit anerkanntem Nationalkomitee auf die Vorsitzenden der Forschungskomitees und auf den Präsidenten der CIGRE verteilt sind. Alle wesentlichen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeitsgremien werden in der CIGRE-eigenen wissenschaftlichen Zeitschrift „Electra" veröffentlicht. Die „Electra" erscheint sechsmal im Jahr, jedes Einzelmitglied der CIGRE erhält ein Exemplar, die Kollektivmitglieder erhalten zwei Exemplare.

Die folgenden Zahlen mögen das wachsende Interesse an der Arbeit der CIGRE demonstrieren:

| | 1921 | 1984 |
|---|---|---|
| Zahl der Länder deren Vertreter an den Sessionen teilnehmen: | 12 | 70 |
| Teilnehmer an der CIGRE-Session: | 200 | 2300 |
| Zahl der Mitglieder (Einzel- und Kollektivm.) (Die Mitgliedschaft wurde erst ab 1930 registriert) | 500 | 3500 |

Die Einzelmitglieder bzw. die Vertreter der Kollektivmitglieder eines Landes können ein Nationalkomitee bilden. Entsprechend dem Statut der CIGRE kann einem Nationalkomitee — bestehend aus mindestens 40 Einzelmitgliedern oder 8 Kollektivmitgliedern oder einer entsprechenden Kombination aus diesen — nach einem Antrag die Registrierung beim Central Office gewährt werden. Die Bestätigung der Registrierung des Nationalkomitees CIGRE der Deutschen Demokratischen Republik erfolgte anläßlich der Generalversammlung 1980 nach Zustimmung durch den Verwaltungsrat.

## 2. Organisatorischer Aufbau der CIGRE

Die Generalversammlung — gebildet von den Einzel- und Kollektivmitgliedern — wählt jeweils im Rahmen der Session in Paris den Verwaltungsrat, der aus etwa 40 Mitgliedern besteht. Der Verwaltungsrat wählt aus seinen Reihen den Präsidenten der CIGRE und den Schatzmeister.

Der Verwaltungsrat ernennt die Mitglieder des Exekutiv-Komitees, das alle wesentlichen Richtlinien für die laufende Legislaturperiode erarbeitet, über die der Rat dann entscheidet. Parallel dazu wählt der Verwaltungsrat den Vorsitzenden für das Technische Komitee, dem alle Vorsitzenden der Forschungskomitees (SCs) angehören. Das Technische Komitee koordiniert insbesondere die fachlichen und organisatorischen Probleme der einzelnen Forschungskomitees, die sich thematisch berühren. Dazu gehören auch Fragen wie die Zuordnung der den SCs zugestandenen Zahlen für die „papers", da die Entwicklungsprobleme und die Aktivitäten in den 15 Forschungskomitees naturgemäß nicht völlig synchron verlaufen.

## 3. Arbeitsweise der Forschungskomitees (SCs)

Die Thematik bzw. Aufgaben der 15 SC (Übersicht auf der folgenden Seite) sind allgemein aus den umfassenden Berichterstattungen über die Sessionen von 1980, 1982 und 1984 bekannt [2] [3] [4]. Die SCs sind Fachgremien, denen maximal 24 Experten aus 24 verschiedenen Ländern angehören. Die Mitgliedschaft ist wie in allen anderen CIGRE-Gremien stets personengebunden. Während die jährlich einmal stattfindende Fachberatung der SCs in dem Jahr mit gerader Jahreszahl im Rahmen der Session in Paris stattfindet, ist in den Jahren dazwischen ein anderes Land Gastgeber für die dann etwa 4 bis 5 Tage dauernden Kolloquien. Da auch die Themen der SCs noch sehr komplex sind, bilden diese für die Bearbeitung der technisch-wissenschaftlichen Teilkomplexe sogenannte working groups (WG), deren Leiter anläßlich dieser SC-Sitzungen einen Fortschrittsbericht über die geleistete Arbeit vorlegt, der durch weitere Sachbeiträge ergänzt wird, bis

[1]) Die Abkürzung CIGRE ist der französischen Bezeichnung entnommen: Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques a Haute Tension.

das angestrebte Ziel der Arbeit erreicht wird. Da alle aufgegriffenen Probleme in der CIGRE Fragen aus der Praxis sind, die sich meist bei der Einführung neuer Technologien, neuer Spannungsbereiche, neuer Prüfprozesse usw. ergeben, werden diese Erkenntnisse in der Zeitschrift „Electra" veröffentlicht oder anläßlich der Session zur öffentlichen Diskussion gestellt oder auch den entsprechenden IEC-Gremien übergeben, wenn sich eine Empfehlung für eine Normung als notwendig erweist. In den SC-Sitzungen werden aber auch zur Förderung der technischen Entwicklung die bevorzugten Diskussionsthemen für die nächste Session 3 bis 5 Jahre im voraus erarbeitet. Diese kontinuierliche, gezielte und weit vorausschauende wissenschaftliche Arbeit ist ein Kernstück des weltweit anerkannten progressiven Wirkens der CIGRE.

### 4. Symposien der CIGRE

In den Jahren zwischen den Sessionen veranstaltet die CIGRE ein oder zwei Symposien. Das sind weltoffene wissenschaftliche Veranstaltungen, die stets außerhalb Frankreichs stattfinden und die von einem SC mit Unterstützung des Exekutiv-Komitees sowie dem Technischen Komitee vorbereitet und gestaltet werden. Sie stehen meist unter einem Thema, das weltweit interessiert und zu dem Experten aus aller Welt aufgerufen sind, sich durch geeignete wissenschaftlich-technische Beiträge zu der genannten Thematik zu äußern.
Es ist ein Grundanliegen der CIGRE, die vielfältigen Probleme der Elektrifizierung der Entwicklungsländer in ihre Arbeit einzubeziehen und die Vertreter dieser Länder an dem weltweiten Erfahrungsaustausch auf den Fachtagungen der CIGRE teilhaben zu lassen [5].
Entsprechend diesem Anliegen wird das Symposium zum Thema:

„Die Elektroenergiesysteme der Entwicklungsländer"

im November 1985 in Dakar (Senegal) in Kooperation mit der UPDEA (Union der Erzeuger und Verteiler von Elektroenergie der Länder Afrikas) durchgeführt. Die Diskussionsthemen kennzeichnen die besondere Thematik dieser Länder:

- Die Rolle der Elektrifizierung in der Energiepolitik der Entwicklungsländer
- Die Gestaltung kleiner Inselnetze und deren Weiterentwicklung zu Verbundnetzen
- Die Notwendigkeit von Elektroenergie-Übertragungssystemen zur Nutzbarmachung weit entfernter Energieressourcen
- Die Rolle neuer Technologien
- Allgemeine Aspekte für den Aufbau von Elektroenergiesystemen in den Entwicklungsländern.

Diese Themen sind durch weitere Detailfragen bzw. Aspekte untergliedert. Das Organisationskomitee wird von Mitgliedern des SC 37 (Betrieb und Planung von Energiesystemen) mit einem Vertreter der UPDEA gebildet.
Im Juni 1985 findet ein weiteres Symposium zum Thema:

„Hohe Ströme in Elektro-Energiesystemen"

in Brüssel (Belgien) statt. Das Organisationskomitee wird geleitet von Herrn Th. Ykema, Vorsitzender des SC 23 (Umspannwerke).

Als Diskussionsthemen sind vorgesehen

- Die kurz- und längerfristigen Erwartungen bezüglich der Entwicklung der Kurzschlußströme in Hoch-, Höchst- und Ultrahochspannungsnetzen
- Hohe Betriebsströme in Netzen, Umspannwerken und Kraftwerken
- Kurzschluß- und Erdfehlerströme in Netzen, Umspannwerken und Kraftwerken
- Erdungsprobleme

Auch hier sind die genannten Themen durch weitere Detailfragen aufgegliedert.
Über die vorgenannten Symposien wird in der bekannten Form in der ELEKTRIE berichtet werden.
Das Nationalkomitee CIGRE der DDR wird bemüht sein, die Vorzugsthemen für die Diskussion zur 31. Session in den wesentlichsten Forschungskomitees an gleicher Stelle zu veröffentlichen, um die Leser der Fachzeitschrift ELEKTRIE an der kontinuierlichen Arbeit der CIGRE unmittelbar teilhaben zu lassen.

### Literatur


[1] Information des Central Office der CIGRE
[2] 28. Session der CIGRE 1980. ELEKTRIE, Berlin 34 (1980) 12, S. 651 bis 668
[3] 29. Session der CIGRE 1982. ELEKTRIE, Berlin 36 (1982) 12, S. 644 bis 660
[4] 30. Session der CIGRE 1984. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 1, S. 25 bis 38
[5] Müller, O.: Bericht vom „open day" der 29. Session der CIGRE 1982 in Paris. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 6, S. 325 bis 328


EA 1913

## Übersicht der gegenwärtig existierenden 15 Forschungskomitees (SCs) der CIGRE

**1. Sektion: Ausrüstungen**

SC 11: Rotierende Maschinen
SC 12: Transformatoren
SC 13: Schaltgeräte
SC 14: Gleichstrom-Verbindungen
SC 15: Isoliermaterialien

**2. Sektion: Kabel, Leitungen und Umspannwerke**

SC 21: Hochspannungskabel
SC 22: Freileitungen
SC 23: Umspannwerke

**3. Sektion: Systeme**

SC 33: Überspannungen und Isolationskoordination
SC 34: Schutztechnik
SC 35: Nachrichtenübertragung
SC 36: Beeinflussungen
SC 37: Planung und Entwicklung von Energiesystemen
SC 38: Analyse und Techniken der Energiesysteme
SC 39: Betrieb und Planung von Energiesystemen

# Zum Einfluß von Zusätzen auf das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen

**F. Petzold, KDT, Dresden; P. Küllig, KDT, Schwerin**

Mitteilung aus der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden

## 1. Problemstellung

Durch Untersuchungen zum Einfluß von Verunreinigungen auf die elektrische Lebensdauer von extrudierten PE-Isolierungen wurde festgestellt, daß bei den in Starkstromkabeln auftretenden mittleren Betriebsfeldstärken ($\hat{E}_m > 2$ kV/mm) mit einem sehr schnellen Vorwachsen von elektrischen Teilentladungskanälen zu rechnen ist [1] bis [4]. Ausgehend von diesen Erkenntnissen ist anzunehmen, daß die elektrische Lebensdauer einer PE-Isolierung wesentlich von der Zeit bis zum Zünden eines ersten TE-Kanals bestimmt wird. Da es aus ökonomischen und technologischen Gründen nicht möglich ist, Fehlstellen in der technischen Isolierung völlig auszuschließen, werden weltweit Anstrengungen unternommen, durch Zusatz spezieller Additive zum PE eine sogenannte Spannungsstabilisierung zu erreichen [5] bis [7]. Derartige Spannungsstabilisatoren bestehen meist aus aromatischen Kohlenwasserstoff-Verbindungen mit unterschiedlichster Struktur, die durch Wechselwirkungen mit sogenannten „heißen" Elektronen — freie Elektronen, die in Gebieten örtlich erhöhter Feldstärke beschleunigt werden können und damit eine hohe kinetische Energie besitzen — einen Teil ihrer kinetischen Energie übernehmen. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Elektronen mit genügend hoher Energie zur Ionisierung von PE-Molekülen verringert [8].

Nach der Modellvorstellung von *Marcek* [9] kann es im inhomogenen Feld durch dielektrische Kraftwirkungen zu einer Migration von Stabilisatormolekülen in das Gebiet erhöhter Feldstärke (z. B. in das angrenzende Volumen an einem leitfähigen oder nichtleitfähigen Einschluß) kommen. Da die spannungsstabilisierenden Zusätze im allgemeinen eine höhere Dielektrizitätszahl und eine größere Leitfähigkeit als das PE besitzen, wird durch eine lokale Konzentrationserhöhung im Bereich maximaler Feldstärke die Potentialverteilung verändert und die Beanspruchung des Isolierstoffs vermindert.

Das Ziel der Beimengung von Spannungsstabilisatoren ist also eine Verzögerung bzw. Abschwächung elektrischer Alterungsprozesse, wodurch eine Erhöhung der elektrischen Langzeitfestigkeit und damit der Zuverlässigkeit der PE-Isolierung erreicht werden soll.

Zur Nachbildung von technologisch bedingten Fehlstellen — z. B. von Verunreinigungen in der PE-Aderisolierung oder von Störstellen an der Leiterglättungsschicht eines Starkstromkabels —, sowie zur Beobachtung der infolge der extrem inhomogenen Beanspruchungen an diesen Fehlstellen entstehenden irreversiblen Zerstörungen, hat der „Nadel-Test" weit verbreitet Anwendung gefunden [2] [4] [5] [6] [10] u. a.

Wie in den folgenden Betrachtungen noch dargestellt wird, ermöglicht die Verwendung dieser Prüfanordnung außerdem eine reproduzierbare Erfassung der Wirksamkeit der Spannungsstabilisatoren.

Ausgehend von der Tatsache, daß in der technischen PE-Isolierung das Enstehen von elektrischen Teilentladungskanälen verhindert werden muß, wurden experimentelle Untersuchungen zum Kanaleinsatzverhalten von PE-Modellisolierungen mit verschiedenen Zusätzen bei extrem inhomogener elektrischer Beanspruchung durchgeführt. Die dazu verwendete Versuchstechnik entspricht weitgehend der in [4] beschriebenen. Für die im folgenden vorgestellten Untersuchungen kamen dabei ausschließlich Nadel-Platte-Anordnungen mit 5 µm Abrundungsradius der Nadelelektroden und 5 mm Elektrodenabstand zum Einsatz.

## 2. Versuchsergebnisse

### 2.1. Einfluß auf die Kanaleinsatzzeit

Zunächst werden Ergebnisse dargestellt, welche aus Untersuchungen zum Kanaleinsatzzeitverhalten von PE mit einem Zusatz von 0,1 % DPPD (N,N' Diphenyl-p-phenylendiamin) resultieren.

Die ermittelten Realisierungen der Kanaleinsatzzeiten des stabilisierten PE lassen sich im Gegensatz zum unstabilisierten PE nicht bei allen Spannungen mit geschlossenen Verteilungsfunktionen der Weibullverteilung approximieren (Bild 1).

Eine optimale Anpassung von Ausgleichskurven an die Meßwerte bei z. B. $\hat{u}_\sim = 13$ kV oder 10 kV ist nur unter der Annahme von Mischverteilungen möglich. Bei den vorliegenden Mischverteilungen handelt es sich um additive Verknüpfungen von zwei Einzelverteilungen der Form

$$F(t_{ke}) = p_1\left[1-\exp\left[-\left(\frac{t_{ke}}{t_{ke\,63_1}}\right)^{c_1}\right]\right] + p_2\left[1-\exp\left[-\left(\frac{t_{ke}}{t_{ke\,63_2}}\right)^{c_2}\right]\right] \quad (1)$$

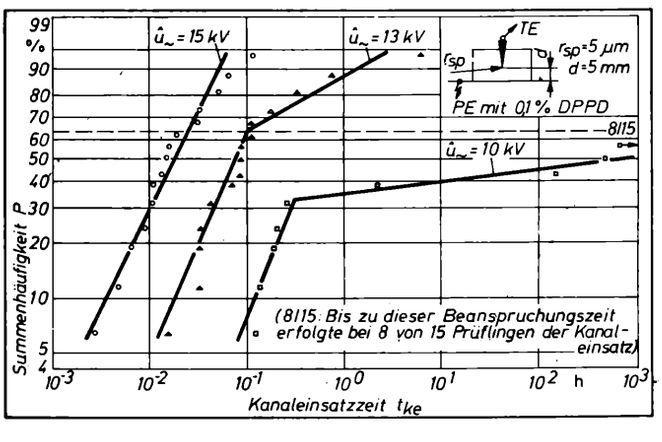
mit $p_1 + p_2 = 1$.

In der Literatur wird das Auftreten von derartigen Mischverteilungen bereits mehrfach im Zusammenhang mit Untersuchungen zum Durchschlagverhalten von stabilisiertem PE beschrieben [5] [7] [9]. Dabei wird die Ursache für das Auftreten dieser Mischverteilungen darin gesehen, daß nur ein Teil der Prüflinge des Stichprobenumfanges von einem Faktor beeinflußt wird, der eine signifikante Auswirkung auf das elektrische Alterungsverhalten besitzt [11].

Das Abknicken der Verteilungsfunktionen zu größeren Kanaleinsatzzeiten bei Beanspruchungszeiten größer $10^{-1}$ Stunde läßt eine zeitabhängige Wirkungsweise des Spannungsstabilisators vermuten. Dem Wirkprinzip nach *Marcek* [9] entsprechend, ist durch die Migration der Stabilisatormoleküle im inhomogenen elektrischen Feld ihre Wirkung erst nach einer gewissen Zeit zu erwarten. Die ermittelten Verteilungsfunktionen bei $\hat{u}_\sim = 15$ kV; 13 kV; 10 kV deuten nicht nur auf eine zeitabhängige, sondern auch auf eine spannungs- bzw. feldstärkeabhängige Migration der Stabilisatormoleküle hin (Bild 1). Mit steigender Spannungsamplitude nimmt die Anzahl der Prüfkörper, die durch eine wirksame Stabilisatormigration zu Realisierungen im oberen Teil der Mischverteilung führen, ab. Bei $\hat{u}_\sim = 15$ kV tritt schließlich keine Mischverteilung mehr auf, d. h., die Prozesse, die zur irreversiblen Zerstörung — dem Kanaleinsatz — führen, sind bereits so intensiv, daß die Stabilisatormigration nicht mehr zur Wirkung kommt.

Um die bezüglich ihrer physikalischen Bedeutung bereits erläuterten Mischverteilungen auch statistisch korrekt zu bewerten, müssen die einzelnen Funktionsäste genau gegeneinander abgegrenzt und jeder für sich allein als Einzelverteilung aufgefaßt und statistisch ausgewertet werden [5] [11] (Bild 2). Damit ergeben sich beispiels-

**Bild 1.** Verteilungsfunktionen der Kanaleinsatzzeiten von Spitze-Platte-Modellprüfkörpern aus PE mit 0,1 % DPPD (Spannungsstabilisator)




Dr.-Ing. *Frank Petzold* ist Abteilungsleiter Erzeugnisentwicklung, Dr.-Ing. *Peter Küllig* ist Leiter der Hauptabteilung Technik und Entwicklung im VEB Kabelwerk Nord. Zur Zeit der Abfassung des Beitrages waren die Autoren wissenschaftliche Assistenten an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden.

Die Autoren danken Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *W. Mosch* für viele wertvolle Anregungen bei der kritischen Durchsicht des Manuskripts. Weiterhin gilt der Dank auch dem VEB Kombinat Kabelwerk Oberspree (KWO) für die nützliche Zusammenarbeit und die Bereitstellung der erforderlichen Prüfkörper im Rahmen der Kooperationsgemeinschaft ELTRA.

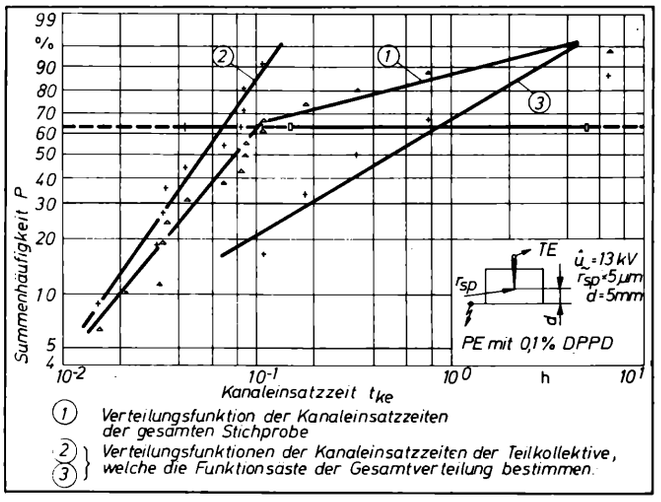



**Bild 2.** Bewertung der Mischverteilung bei Verteilungsfunktionen der Kanaleinsatzzeiten von PE mit Spannungsstabilisator

weise im Bild 2 ($\hat{u}_\sim$ = 13 kV) für den unteren und oberen Funktionsast der Mischverteilung zwei Einzelverteilungen mit eindeutig bestimmbaren Werten für die Streuung und den Erwartungswert. Das heißt, es können jeweils zwei Vertrauensbereiche der 63 %-Quantile der Kanaleinsatzzeiten angegeben werden. Bei der Darstellung der Vertrauensbereiche der ermittelten Verteilungsfunktionen im doppelt-logarithmischen Diagramm der Kanaleinsatzspannungen und -zeiten ergeben sich dadurch zwei Kennlinien der Kanaleinsatzzeiten für stabilisiertes PE gegenüber einer Kennlinie für unstabilisiertes PE (Bild 3).

Die Vertrauensbereiche des unstabilisierten PE sind durch eine Kennlinie, die allgemein mit der Gleichung

$$\lg \hat{u}_{ke} = K_{ke} - \frac{1}{n} \lg t_{ke} \qquad (2)$$

beschrieben werden kann, verbunden. Der Exponent der dargestellten Kennlinie beträgt $n = 8$.

Deutlich ist zu erkennen, daß die Vertrauensbereiche der unteren Funktionsäste der Mischverteilungen und auch der Vertrauensbereich bei $\hat{u}_\sim$ = 15 kV des stabilisierten PE der Kennlinie des unstabilisierten PE zugeordnet werden können. Bei den Prüflingen, die zu diesen Realisierungen beigetragen haben, ist also kein Einfluß des Spannungsstabilisators zu verzeichnen. Dagegen kann durch die Vertrauensbereiche, die aus den oberen Funktionsästen der Mischverteilungen resultieren, eine Kennlinie mit einem Exponent von $n = 15$ gezeichnet werden. Dabei ist anhand der Verteilungsfunktionen zu bemerken (Bild 1), daß mit abnehmender Spannung die Zahl der Prüflinge, die durch eine wirksame Stabilisatormigration beeinflußt werden, zunimmt. Bei der Spannung $\hat{u}_\sim$ = 10 kV wurden bis zu einer Beanspruchungszeit von 500 Stunden nur 8 Realisierungen der Kanaleinsatzzeit der betreffenden Stichprobe festgestellt. Das heißt, ein Teil der Prüflinge wird vermutlich durch die Stabilisatormigration schon so stark beeinflußt, daß bei noch kleineren Spannungen mit einem Abknicken der dargestellten Kennlinie ($n = 15$) zu rechnen ist. Gleichzeitig nimmt die Zahl der Realisierungen, welche die unteren Funktionsäste bilden, ab, bis schließlich alle Prüflinge von einer wirksamen Stabilisatormigration beeinflußt werden. Damit ist in diesem Spannungs-Zeit-Bereich eine Kennlinie mit $n \geqq 15$ zu erwarten.

Bei weiteren Untersuchungen an PE mit einem anderen Spannungsstabilisator (0,1 % Anthracen) wurden prinzipiell die gleichen Erscheinungen wie bei dem PE mit 0,1 % DPPD beobachtet (Bild 4; Bild 5). Auffallend ist jedoch, daß sich die Vertrauensbereiche, die den unteren Funktionsästen der aufgetretenen Mischverteilungen zugeordnet sind, in gewisser Form von denen des unstabilisierten PE abheben (Bild 5). Es ist also auch bei den Prüflingen, welche die unteren Funktionsäste der Mischverteilungen bzw. bei $\hat{u}_\sim$ = 18 kV die gesamte Verteilungsfunktion bestimmen, eine Stabilisatorwirkung erkennbar. Dieses Verhalten ist mit einer direkten Wirkung der zu Beginn der Beanspruchung noch im Polymer homogen verteilten Stabilisatormoleküle erklärbar, wie sie in der Problemstellung als ein mögliches Wirkprinzip der Spannungsstabilisatoren beschrieben wurde.

Betrachtet man die Verteilungsfunktionen der Kanaleinsatzzeiten bei $\hat{u}_\sim$ = 13 kV und 10 kV (Bild 4) so ist festzustellen, daß die typische Mischverteilung bei $\hat{u}_\sim$ = 13 kV in eine Einfachverteilung bei $\hat{u}_\sim$ = 10 kV übergeht, was auf den schon beim PE mit 0,1 % DPPD beschriebenen Effekt der wirksamen Stabilisatormigration zurückgeführt werden kann. Bei der Spannung $\hat{u}_\sim$ = 8 kV wurden bis zu einer Beanspruchungszeit von 700 Stunden keine Realisierungen der Kanaleinsatzzeiten festgestellt, womit die Vorstellungen von der Wirkungsweise des Spannungsstabilisators unterstützt werden.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, daß die untersuchten Spannungsstabilisatoren — abhängig von den mittleren Beanspruchungen und dem Typ des Stabilisators — eine Vergrößerung der Kanaleinsatzzeiten der verwendeten Nadel-Platte-Prüfkörper im Vergleich zum unstabilisierten PE um eine bis mehrere Dekaden bewirken.

### 2.2. Kanalwachstum und Teilentladungs (TE) -verhalten

Die Beobachtungen zum Kanalwachstum in PE mit und ohne Spannungsstabilisator [4] ergaben, daß sich die Aufbauzeit — d. h. die Zeit von der Entstehung des ersten TE-Kanals an der Nadelspitze bis zum Erreichen der Gegenelektrode — durch den Zusatz eines Spannungsstabilisators z. T. erheblich verkürzt. Dieses relativ rasche Kanalwachstum erfolgt in einer besonders feinen und faserigen Form, wie es auch in der Literatur mehrfach erwähnt wird [5] [10]. Im Zusammenhang mit dieser Kanalwachstumsform wurde ein Aussetzen bzw. intermittierendes Auftreten der impulsförmigen Teilentladungen festgestellt. Bei den Untersuchungen am unstabilisierten PE wurde ebenfalls ein zeitweiliges Aussetzen der impulsförmigen TE gemessen, wobei dieses TE-Verhalten durch eine Erhöhung des Gasdruckes infolge von Degradationsprozessen in den TE-Kanälen erklärbar ist. Nach dem Abbau des Gasdruckes durch Diffusionsvorgänge in das umgebende PE setzen die impulsförmigen Gasentladungen wieder ein [12].

Dagegen ist das fast vollständige Aussetzen der impulsförmigen Teilentladungen bei stabilisiertem PE vermutlich auf den in die

**Bild 3.** Kanaleinsatzkennlinien ($p$ = 63 %) von Spitze-Platte-Modellprüfkörpern aus PE mit und ohne Spannungsstabilisator (0,1 % DPPD)

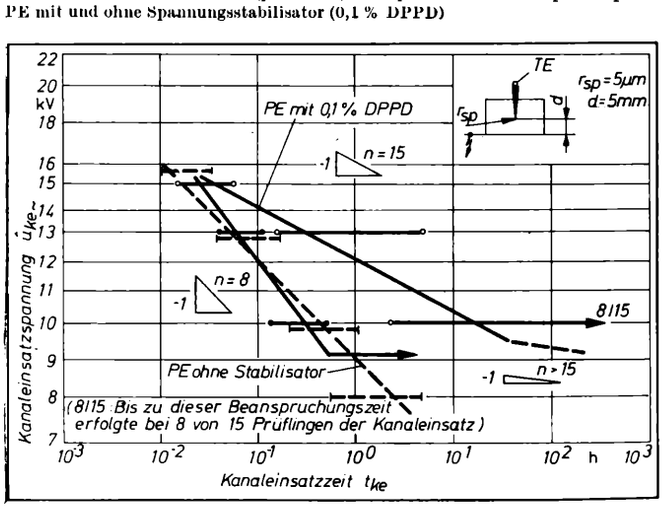
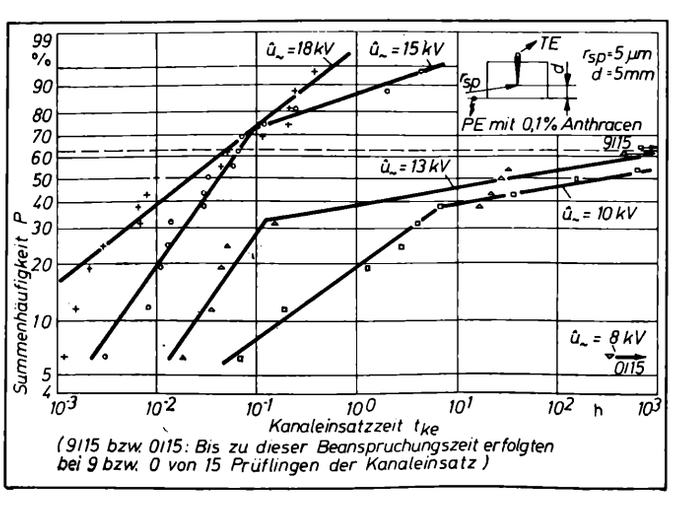



**Bild 4.** Verteilungsfunktionen der Kanaleinsatzzeiten von PE mit 0,1 % Anthracen



TE-Kanäle migrierenden Spannungsstabilisator zurückzuführen, da dieser durch seine erhöhte Leitfähigkeit größere Potentialdifferenzen abbauen und somit Entladungsvorgänge in den TE-Kanälen verhindern kann.

Trotz des längeren Aussetzens der impulsförmigen Entladungen bei den Prüfkörpern aus stabilisiertem PE findet ein Kanalwachstum statt, so daß angenommen werden kann, daß ein anderer „impulsloser"[1]) Ladungsumsatz erfolgt.

Zur Bestimmung dieser „impulslosen" Teilentladungen wurde eine modifizierte integrierende Brückenschaltung nach *Lemke* [13] verwendet. Das Hauptmerkmal einer integrierenden Brücke besteht darin, daß mit ihr auch TE-Ströme mit einer Frequenz nahe 0 Hz bewertet werden können und somit eine sogenannte Gesamtladung bestimmbar ist.

Zum Vergleich wurden die rein impulsförmigen TE-Ströme, d. h. als charakteristische TE-Kenngrößen die maximale Impulsladung bzw. die Summenimpulsladung gemessen.

Am Beispiel eines mit $\hat{u}_{\sim} = 13$ kV belasteten Prüfkörpers aus unstabilisiertem PE sollen die charakteristischen zeitlichen Verläufe der Summenimpulsladung $Q_{SI}$, Gesamtladung $Q_G$ und der Kanallänge $l_K$ diskutiert werden (Bild 6).

Vor dem von impulsförmigen Teilentladungen begleiteten Kanaleinsatz wird ein konstanter Wert der Gesamtladung festgestellt. Mit dem Einsetzen und Ansteigen der Summenimpulsladung ist in gleichem Maße eine Änderung der Gesamtladung zu verzeichnen. Diese fast proportionale Änderung von Summenimpuls- und Gesamtladung bleibt während der gesamten Prüfdauer erhalten, wobei auch mit wachsender Kanallänge ein nahezu konstanter TE-Pegel vorherrscht.

Die Untersuchungen am spannungsstabilisierten PE ergaben einen qualitativ völlig anderen Verlauf der Summenimpuls- und Gesamtladung (Bild 7). Bereits vor dem von impulsförmigen Teilentladungen gekennzeichneten Kanaleinsatz steigt die Gesamtladung stetig an. Unmittelbar nach dem Verlöschen der impulsförmigen Teilentladungen ist ein beschleunigtes faseriges Kanalwachstum zu beobachten, wobei sich der zeitliche Verlauf der Gesamtladung proportional zur wachsenden Kanallänge verhält. Der Anstieg der Gesamtladung vor dem Kanaleinsatz deutet auf eine Migration und damit auf eine Konzentrationserhöhung des Spannungsstabilisators in Spitzennähe hin. Dadurch ändert sich die Kapazität des Prüflings, welche das Meßsystem als Ladungsänderung bewertet.

Dieses TE-Verhalten und die gleichzeitige Vergrößerung der Kanaleinsatzzeit durch die Wirkung des Spannungsstabilisators unterstützen die in der Problemstellung dargestellte Modellvorstellung von der Wirkungsweise der Stabilisatoren.

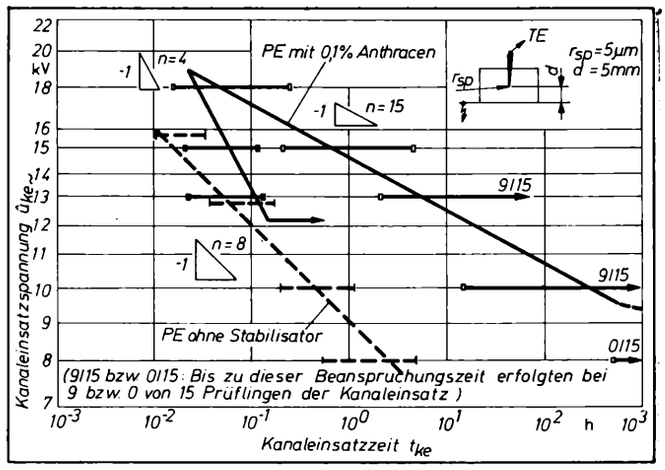
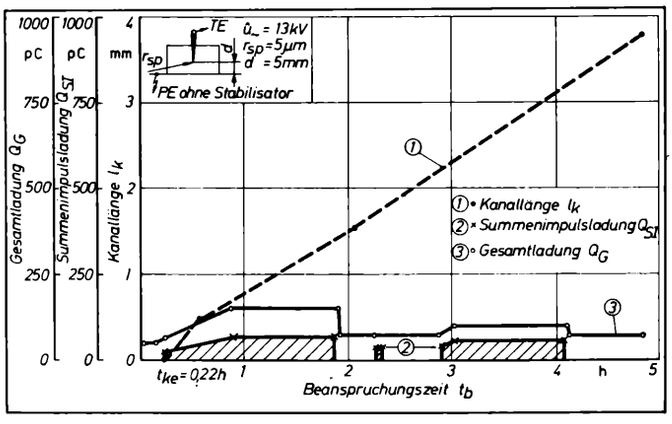



**Bild 5.** Kanaleinsatzkennlinie ($p$ = 63 %) von Spitze-Platte-Modellprüfkörpern aus PE mit und ohne Spannungsstabilisator (0,1 % Anthracen)

**Bild 6.** TE-Kenngrößen und Kanalwachstum für PE ohne Spannungsstabilisator




## 3. Schlußfolgerungen

Die elektrische Lebensdauer von PE-Isolierungen wird wesentlich von der Zeit bis zum Zünden eines ersten TE-Kanals bestimmt [4]. Deshalb ist in Zukunft außer den bisher üblichen Maßnahmen (strenge Reinheitskontrolle des Isolier-PE; TE-Prüfung u. a.) vor allem für Hochspannungskabel mit PE-Isolierung ein verstärkter Einsatz von sogenannten Spannungsstabilisatoren zu erwarten.

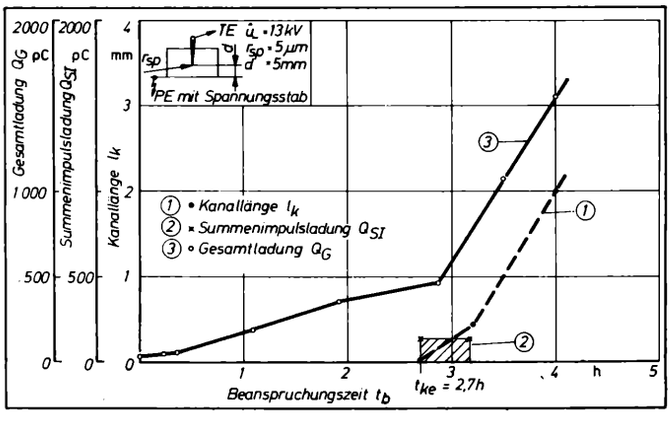
Die vorgestellten Ergebnisse zum elektrischen Langzeitverhalten von PE mit Spannungsstabilisatoren wurden an Nadel-Platte-Modellanordnungen gewonnen, welche als Nachbildungen technologisch bedingter Fehlstellen in der PE-Aderisolierung von Starkstromkabeln dienen sollen.

Aus dem Vergleich der Kanaleinsatzzeiten der Prüfkörper aus stabilisiertem und unstabilisiertem Polyethylen ergibt sich eine Vergrößerung der Kanaleinsatzzeit durch die Wirkung des Spannungsstabilisators. Dabei treten die Verteilungsfunktionen der Kanaleinsatzzeiten z. T. als additive Mischverteilungen auf, so daß sich für die Modellisolierung aus PE mit Spannungsstabilisator zwei Kennlinien der Kanaleinsatzzeiten ergeben.

Bei Untersuchungen zum TE-Verhalten wurde bei stabilisiertem PE bereits vor dem Kanaleinsatz ein Ansteigen der Gesamtladung gemessen. Die Bewertung dieses TE-Verhaltens unterstützt die zur physikalischen Erklärung der Ergebnisse verwendete Modellvorstellung von der Wirkungsweise der Spannungsstabilisatoren [7] [8] [9].

Der in Zukunft sicherlich noch verstärkte Einsatz von PE-Isolierungen für höhere Spannungen erfordert immer weitere Erkenntnisse über Möglichkeiten zur Verbesserung der elektrischen Langzeitfestigkeit dieser Isolierungen. Die vorgestellten Ergebnisse der Untersuchungen an PE mit verschiedenen Spannungsstabilisatoren sollen in dieser Hinsicht zur Entwicklung zuverlässiger Hochspannungsisolierungen aus PE beitragen.

**Bild 7.** TE-Kenngrößen und Kanalwachstum für PE mit Spannungsstabilisator (Anthracen)




[1]) Die Bezeichnung „impulslose" Teilentladungen bezieht sich auf den nicht typisch impulsförmigen Charakter dieser Teilentladungen.

## Literatur

[1] *Gazzana Priaroggia, P.:* Special report for group 21 (High Voltage Cables) Spezial-Bericht für Gruppe 21 (Hochspannungskabel). CIGRE-Bericht 21-00, August 1980

[2] *Küllig, P.:* Zum Einfluß von Fehlstellen auf die elektrische Lebensdauer von extrudierten Polyäthylen-Isolierungen bei Wechselspannungsbeanspruchung. Diss. A, TU Dresden 1982

[3] *Küllig, P.; Schierig, S.; Weißenberg, W.:* Erfahrungen mit Polyäthylen als Isolierstoff für Mittelspannungskabel. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 363 bis 367

[4] *Küllig, P.; Petzold, F.:* Das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen bei Wechselspannungsbelastung. ELEKTRIE; Berlin 38 (1984) 8, S. 309 – 311

[5] *Ulrich, J.:* Über den Einfluß der Temperatur auf das Durchschlagverhalten von Polyäthylen im inhomogenen elektrischen Wechselfeld. Diss. A, TU Hannover 1978

[6] *Griač, J.:* Beeinflussung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Teilentladungskanälen durch Zusatzstoffe im Polyäthylen. 25. Int. Wiss. Kolloquium TH Ilmenau (1980) Tagungsband H. 3-A 3; S. 33 – 36

[7] *Feichtmayr, F.; Würstlin, F.:* Die Spannungsstabilisierung von Hochdruck-Polyäthylen. Kunststoffe 60 (1970) 6; S. 381 – 384

[8] *Voigt, J.:* Die Stabilisierung der Kunststoffe gegen Licht und Wärme. Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag 1966

[9] *Marček, O.;* u. a.: Untersuchungen der Ursachen der bimodalen Verteilung der Logarithmen der Durchschlagzeiten von spannungsstabilisiertem Polyäthylen. ETZ-A 94 (1973) 2, S. 95 – 96

[10] *Löffelmacher, G.; Madry, P.; Ulrich, J.:* Gesichtspunkte für den Einsatz einer Nadel-Platte-Modellanordnung zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit von hochpolymeren Isolierstoffen. Vortrag ETG-Fachtagung 19. – 20. Oktober (1977) in Baden-Baden, S. 130 – 135

[11] *Dokopoulos, P.:* Wachstumsgrenze der Durchschlagwahrscheinlichkeit von Hochspannungsisolierungen. Diss. A, TH Braunschweig 1967

[12] *Löffelmacher, G.:* Über die physikalisch-chemischen Vorgänge bei der Ausbildung von Teilentladungskanälen in Polyäthylen und Epoxidharz im inhomogenen Wechselfeld. Diss. A, TU Hannover 1976

[13] *Lemke, E.:* Ein Beitrag zur Messung impulsloser TE bei Wechselspannung. ELEKTRIE, Berlin 30 (1976) 9, S. 479 – 482


EA 5335


*Noch lieferbar:*

**Elektrotechnologie**

Herausgeber: *H. Conrad; R. Krampitz.* Berlin: VEB Verlag Technik 1983. 1. Auflage. 399 Seiten, 305 Bilder, 85 Tafeln. Kunstleder 38,— Mark.

Bestell-Nr. 553 221 1

Leserstimmen zum vorliegenden Werk:

„. . . *Das Buch zeichnet sich durch eine vom Ingenieur bevorzugte knappe textliche Darstellung, formelmäßige Beschreibung sowie die Verwendung zahlreicher Diagramme und Tabellen aus. In einer Reihe von Fällen wird die Anschaulichkeit durch Fotos von Anlagen und Werkstücken wirkungsvoll unterstützt. Auf weitergehende Informationen verweisen etwa 300 Literaturquellen. Damit ist ein breiter Nutzerkreis vom Praktiker über den auf diesen Gebieten wissenschaftlich Tätigen bis zu den Studenten einschlägiger Fachrichtungen angesprochen. Zur besseren Nutzung der diesen Verfahren innewohnenden Vorteile . . . ist diesem Buch eine schnelle Verbreitung zu wünschen.*"

(Prof. Dr. sc. techn. *W. Voelkner*, TU Dresden)

„. . . *In der Praxis kann es insbesondere den Technologen und den Projektanten für technologische Verfahren dienlich sein wie den Konstrukteuren der einschlägigen Gerätetechnik. Damit ist ein wichtiges Werk vorgelegt worden, das eine Lücke auf dem Buchmarkt schließt . . . und es bleibt zu hoffen, daß die Ergebnisse dieses Buches auch eine Grundlage dafür bilden, daß in Zukunft in verstärktem Maße klassische Be- und Verarbeitungsverfahren durch moderne elektrotechnische Verfahren abgelöst werden. . . .*"

(Prof. Dr. sc. techn. *P.-K. Budig*, TH Karl-Marx-Stadt)


# Einfluß der Diffusion von $SF_6$ auf die Kanaleinsatzzeit von Polyethylen- und Epoxidharz-Modellisolierungen


**F. Petzold, KDT; J. Schwarz, KDT; M. Eberhardt, KDT Dresden**

Mitteilung aus der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden


## 1. Problematik

Die in [1] [2] beschriebenen Ergebnisse zeigen, daß die elektrische Lebensdauer von PE-Isolierungen wesentlich von der Zeit bis zum Entstehen erster irreversibler Teilentladungskanäle bestimmt wird. Durch gezielte Zusätze (sogenannte Spannungsstabilisatoren) zum PE ist es möglich, die Kanaleinsatzzeit zu vergrößern und damit auch die Langzeitfestigkeit einer technischen Isolierung zu erhöhen. In jüngster Zeit mehren sich in der Literatur Hinweise, daß außer durch Spannungsstabilisatoren auch nach der Diffusion von $SF_6$ in feste organische Isolierstoffe eine Langzeitstabilisierung festzustellen ist und diese zum Teil bereits technisch genutzt wird. Die prinzipiellen Zusammenhänge zur Diffusion von $SF_6$ in PE beschreiben *Michaels* und *Bixler* [3]. Demnach diffundiert $SF_6$ in die amorphen Bereiche des PE, wobei die Konzentration $c$ des an der Stelle $x$ gelösten Gases von der Zeitdauer $t$, der Temperatur $\vartheta$ während des Diffusionsvorganges und vom Anteil der amorphen Phase des PE selbst abhängt. Die zeit- und ortsabhängige Änderung der Konzentration des gelösten Stoffes kann mit dem 2. Fickschen Gesetz

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{1}$$

(bei oftmals möglicher eindimensionaler Darstellung) beschrieben werden.

Dabei wird der Diffusionskoeffizient $D$ vom sogenannten Lösungsmittel (z. B. PE), dem gelösten Stoff (z. B. $SF_6$) und der Temperatur während des Vorganges bestimmt. Ausgehend von diesen prinzipiellen Erkenntnissen beschreibt *Kreuger* [4] ein PE-isoliertes 150-kV-Versuchskabel, dessen Isolierung durch einen ständigen Gasüberdruck im mehrdrähtigen Innenleiter und in der Aderschirmung mit $SF_6$ imprägniert wurde. Dabei ergaben Lebensdaueruntersuchungen bei Höchstfeldstärken am Innenleiter von über 10 kV/mm nach der „$SF_6$-Imprägnierung" des Kabels bis zu 3 Dekaden größere Durchschlagzeiten gegenüber der nichtimprägnierten Anordnung. *Westerholt* [5] stellte bei Untersuchungen an PE-Modellprüfkörpern (homogene Elektrodenanordnung) sowohl eine Erhöhung der elektrischen Langzeitfestigkeit als auch der Kurzzeitfestigkeit fest, die auf den Einfluß von im PE gelöstem $SF_6$ zurückgeführt wurde. Dieser Effekt trat bereits nach einer Diffusionsdauer von einigen Minuten auf. Daraus wird gefolgert, daß das nur wenige µm in das Polymer eingedrungene $SF_6$ (als Elektroden wurde die metallisierte PE-Oberfläche benutzt, womit eine Diffusion direkt durch die Elektrodenfläche möglich war) die Wirkung von feldverstärkenden Störstellen (z. B. an den Elektroden) abschwächt. Darauf aufbauend untersuchte *Sachs* [6] die Erhöhung der Durchschlagfestigkeit von PE nach einer $SF_6$-Lagerung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (z. B. Temperatur, Morphologie des PE). Es wurde festgestellt, daß bereits geringste Mengen im PE gelöster $SF_6$-Moleküle (etwa $10^{15}$ $cm^{-3}$) zu einer maximalen Festigkeitserhöhung führen, so daß z. B. $SF_6$-imprägnierte PE-Kabel möglicherweise ohne gasdichten Mantel hergestellt und betrieben werden könnten. *Kojima* u. a. [7] beschreiben Ergebnisse zum Einfluß der Diffusion von $SF_6$ in PE nicht nur hinsichtlich der Durchschlagzeit, sondern getrennt nach Einflüssen auf den Kanaleinsatz und das Kanalwachstum.


Dr.-Ing. *Frank Petzold* ist Abteilungsleiter Erzeugnisentwicklung im VEB Kabelwerk Nord. Dr.-Ing. *Jochen Schwarz* ist Hauptabteilungsleiter Schaltgeräteentwicklung im VEB Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" Berlin. Dr. sc. techn. *Martin Eberhardt* ist Dozent an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden.



Die Autoren danken den Kollegen *W. Weißenberg* und *H.-W. Eckhard* vom VEB Kabelwerk Meißen für die freundliche Unterstützung bei der Anfertigung der IR-Spektrogramme.

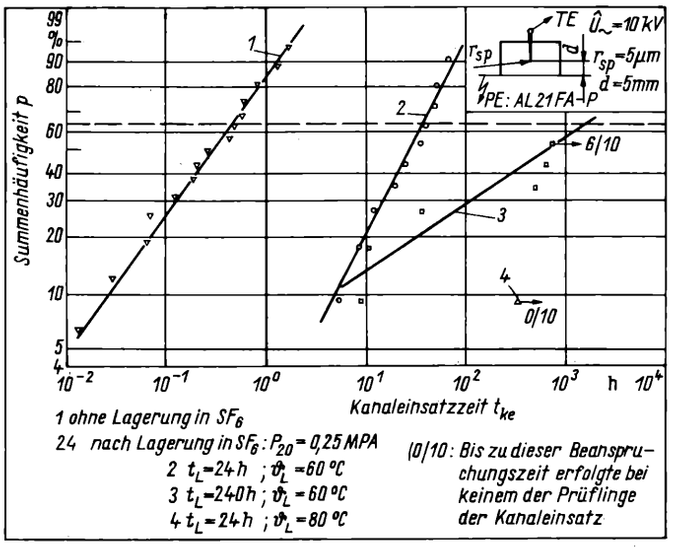



**Bild 1.** Kanaleinsatzzeiten von PE-Prüfkörpern

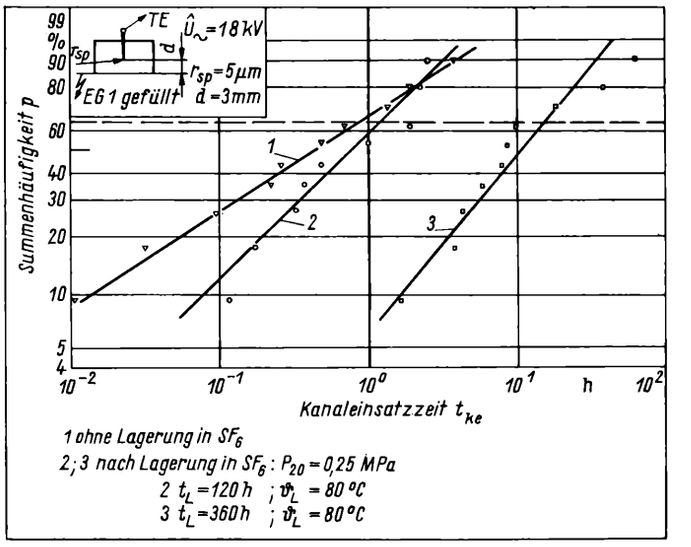



**Bild 2.** Kanaleinsatzzeiten von Epoxidharz – Prüfkörpern

Die Untersuchungen an $SF_6$-imprägnierten Spitze-Platte-Prüfkörpern aus PE ohne andere stabilisierende Zusätze ergaben dabei lediglich eine geringe Erhöhung der Kanaleinsatzspannungen. Erst bei Verwendung von spannungsstabilisiertem PE wurden deutlich höhere Werte der Kanaleinsatzspannung gemessen, die sicher hauptsächlich auf die Wirkung des Spannungsstabilisators zurückzuführen sind. In beiden Fällen wurde jedoch bei Anwesenheit von $SF_6$ ein langsameres Wachstum der Teilentladungskanäle beobachtet.

Insgesamt erscheint bei *Kojima* jedoch die Wirkung des im PE gelösten $SF_6$ — bisherigen Erkenntnissen folgend — auf die technisch bedeutsame Kanaleinsatzzeit noch nicht ausreichend geklärt. Davon ausgehend wird über eigene Untersuchungen zum Kanaleinsatzverhalten von $SF_6$-imprägnierten PE-Modellisolierungen berichtet. Da $SF_6$ prinzipiell auch in Epoxidharz diffundiert, interessiert in diesem Zusammenhang, ob dadurch ebenfalls das Kanaleinsatzverhalten von Epoxidharzmodellisolierungen beeinflußt wird.

## 2. Experimentelle Ergebnisse

Für die Untersuchungen an PE-Prüfkörpern wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse die Elektrodenanordnung vorangegangener Versuche verwendet (Nadel-Platte-Anordnung, $r_{Sp}$ = 5 µm; $d$ = 5 mm; [2]). Bei den Messungen an Epoxidharz-Prüfkörpern beträgt der Elektrodenabstand bei gleichem Spitzenradius ( 5 µm) $d$ = 3 mm. Nach einer Lagerung der jeweiligen Stichprobe von $m$ = 10 Prüfkörpern in einem Druckgefäß bei $p_{20}$ = 0,25 MPa $SF_6$-Gasdruck und definierten Lagerungsbedingungen (Lagerungszeit $t_L$; Lagerungstemperatur $\vartheta_L$), erfolgte die elektrische Beanspruchung im Dauerspannungsversuch. Die Kanaleinsatzzeiten der Prüfkörper waren wiederum durch die Teilentladungsmessung genau erfaßbar [1]. Nach einer Lagerung der PE-Prüfkörper von 24 Stunden in $SF_6$ bei $\vartheta_L$ = 60 °C ergeben die Realisierungen der Kanaleinsatzzeiten ($\hat{U}_{\sim}$ = 10 kV) eine Verteilungsfunktion, die im Vergleich zu Prüfkörpern ohne $SF_6$-Lagerung um etwa 1,5 Dekaden zu größeren Zeiten verschoben ist (Bild 1: Kurven 1; 2). Eine Verlängerung der Lagerungsdauer in $SF_6$ bei gleicher Temperatur führt zu einer weiteren Vergrößerung des 63 %-Quantils der Verteilungsfunktion (Bild 1: Kurve 3). Jedoch werden die kleinen Quantile der Verteilungsfunktion durch die längere Lagerungszeit nicht beeinflußt.

In einem weiteren Versuch zeigte sich dagegen, daß eine Lagerung der Prüfkörper in $SF_6$ bei einer höheren Temperatur ($\vartheta_L$ = 80 °C; $t_L$ = 24 h) eine beträchtliche Vergrößerung der Kanaleinsatzzeit zur Folge hat (Bild 1: Kurve 4). Bis zu einer Beanspruchungszeit von 600 Stunden wurde an keinem der Prüflinge ein Kanaleinsatz festgestellt. Zur physikalischen Deutung dieser Versuchsergebnisse erfolgten IR-spektrografische Untersuchungen an Mikrotomschnitten, die aus dem Probenmaterial unmittelbar vor den Nadelelektroden angefertigt wurden. Dabei zeigten sich Absorptionsbanden bei einer Wellenzahl von $\mu$ = 932 $cm^{-1}$, die eindeutig auf eingelagerte $SF_6$-Moleküle im PE zurückzuführen sind. Gleichzeitig war eine Abhängigkeit der auf die Dicke der Mikrotomschnitte bezogenen Extinktion — als indirektes Maß für die Konzentration des $SF_6$ im PE — sowohl von der Lagerungszeit als auch von der Lagerungstemperatur festzustellen. So konnte die aufgrund der Kanaleinsatzuntersuchungen vermutete Konzentrationserhöhung von $SF_6$ bei längerer Lagerungszeit ($\vartheta_L$ = 60 °C) auch IR-spektrografisch bestätigt werden.

Wegen der exponentiellen Zunahme des Diffusionskoeffizienten $D$ mit steigender Temperatur wirkt sich eine erhöhte Lagerungstemperatur ($\vartheta_L$ = 80 °C) deutlich stärker auf den Diffusionsvorgang und damit auch auf das Kanaleinsatzverhalten der Prüfkörper aus. Selbst nach einer mehrwöchigen Lagerung dieser Prüfkörper in freier Atmosphäre konnten durch die IR-Spektroskopie noch $SF_6$-Anteile im Polymer nachgewiesen werden. Die Untersuchungen an Epoxidharz-Prüflingen (EG 1 mit 200 Masseteilen Quarzmehl gefüllt) zeigen prinzipiell ebenfalls eine Abhängigkeit der Kanaleinsatzzeit von einer vorangegangenen Lagerung in $SF_6$ (Bild 2). Hierbei wird jedoch deutlich, daß wesentlich längere Lagerungszeiten bei $\vartheta_L$ = 80 °C erforderlich sind, um einen ähnlichen Effekt der Langzeitstabilisierung wie im PE zu erreichen. Ob Lagerungstemperaturen über 80 °C zu einer ähnlichen Beschleunigung der Diffusion führen wie bei PE ($\vartheta_L$ = 60 °C auf $\vartheta_L$ = 80 °C), müssen weitere Untersuchungen zeigen.

## 3. Schlußfolgerungen

In Erweiterung bisher bekannter Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, daß nach der Diffusion von $SF_6$ in Modellisolierungen aus PE (ohne spannungsstabilisierende Zusätze) und gefülltem Epoxidharz zum Teil erheblich längere Kanaleinsatzzeiten auftreten. Offenbar werden die bei elektrischer Beanspruchung im Isolierstoff verstärkt vorhandenen freien Elektronen an das stark elektronegative $SF_6$ angelagert und damit die Wahrscheinlichkeit der Akkumulation von irreversiblen Zerstörungen im Polymer herabgesetzt. Für die technische Anwendung $SF_6$-imprägnierter Feststoffisolierungen erscheinen weitere Grundlagenuntersuchungen sowohl zum Diffusionsvorgang als auch zu den Auswirkungen auf die elektrische Lebensdauer erforderlich.

## Literatur

[1] *Küllig, P.; Petzold, F.:* Das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen bei Wechselspannungsbelastung. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 8, S. 309 – 311

[2] *Petzold, F.; Küllig, P.:* Zum Einfluß von Zusätzen auf das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985), 3, S. 85 bis 88

[3] *Michaels, A. S.; Bixler, H. J.:* Solubility of gases in polyethylene. Journal of Polymer Science (1961) S. 393 – 412

[4] *Kreuger, F. H.:* Polyethylene insulated cable with diffused gas. CIGRE Paris (1970), paper 21 – 02

[5] *Westerholt, H.:* Der Zusammenhang zwischen der Größe des Isolierstoffvolumens und der Wechselspannungsfestigkeit von Polyethylen unter dem Einfluß von $SF_6$. Diss. A, Schering-Institut Hannover 1980

[6] *Sachs, G.:* Der Einfluß von Schwefelhexaflourid ($SF_6$) auf das Leitungs- und Durchschlagverhalten von Polyethylen. Diss. A, Schering-Institut Hannover 1980

[7] *Kojima, T.;* u. a.: Characteristics of polyethylene impregnated with various gases. IEEE Trans. PAS (1974), S. 579 – 589

EA 5336

# Einfache Rechenvorschriften für die elektrische Festigkeit heißer, thermisch inhomogener Gasstrecken in $SF_6$

**L. Rothhardt, Jena**

Ingenieure wünschen handliche Formeln, die wesentliche Einflüsse deutlich charakterisieren. Mit Hilfe der EDV wird es auch unter komplizierteren Bedingungen (thermisch inhomogen; elektrisch schwach inhomogenen, also noch keine Teilentladungseffekte) möglich, die Durchbruchsspannung einer heißen Gasstrecke in $SF_6$ mit Hilfe einfacher Rechenvorschriften zu ermitteln, wenn der Temperaturverlauf $T(n)$ über $n_d$ gleichgroßen Streckenabschnitten $n$ zwischen den Elektroden bekannt ist.

## 1. Schwach zeitabhängige Vorgänge ($SF_6$ als heißes Isoliergas)

Zur Herleitung einer Rechenvorschrift für langsam veränderliche Temperaturverteilungen gehen wir von der gut bekannten *Raether*schen Durchbruchsbedingung [1] aus

$$\int_0^d \bar{\alpha}\,\mathrm{d}x \geqq 18{,}5. \tag{1}$$

Die Feldabhängigkeit des $\bar{\alpha}$ ist für $SF_6$ linear [1]:

$$\bar{\alpha} = K_0\,(E - E_{dJ}). \tag{2}$$

Da wir Temperaturabhängigkeiten berücksichtigen müssen, treten an die Stelle der (bei Isothermie gültigen) Ähnlichkeitsparameter $\bar{\alpha}/p$ und $E/p$ die allgemeineren Größen $\bar{\alpha}\cdot\lambda$ und $E\cdot\lambda$ bzw. $\bar{\alpha}/N$ und $E/N$. Die Größe $\lambda$ ist hierbei die mittlere freie Weglänge der Elektronen und $N$ die Teilchendichte im Gas. Für $E_{dJ}$ kann dann die lokale Abhängigkeit von $N$ bzw. $p$ und $T$ sowie von der (mit $T$ variierenden) chemischen Zusammensetzung des heißen Gases ($SF_6$ und Zersetzungsprodukte) beschrieben werden mit

$$E_{dJ} = E_{dJ0}\,\frac{p}{p_0}\,\frac{T_0}{T}\,\chi(T). \tag{3}$$

Die Größe $\chi(T)$ ist aus Relativmessungen der elektrischen Festigkeit thermisch homogener heißer Gasstrecken mit Hilfe der Stoßrohrtechnik zu ermitteln [2]. Es ist

$$\chi(T) = \begin{cases} 1 & \text{für } T \leqq 800\,\mathrm{K} \\ 0{,}8 & \text{für } 800\,\mathrm{K} < T \leqq 2000\,\mathrm{U} \\ (2900\,\mathrm{K} - T)/1125\,\mathrm{K} & \text{für } 2000\,\mathrm{K} < T \leqq 2900\,\mathrm{K} \\ 0 & \text{für } T > 2900\,\mathrm{K}. \end{cases} \tag{4}$$

Die Durchbruchsbedingung (1) lautet nun

$$\int_0^d \left(E - E_{dJ0}\,\frac{p}{p_0}\,\frac{T_0}{T}\,\chi\right)\mathrm{d}x \geqq 0 \tag{1'}$$

bzw.

$$U_d = \int_0^d E\,\mathrm{d}x = E_{dJ0}\int_0^d \frac{p}{p_0}\,\frac{T_0}{T}\,\chi\,\mathrm{d}x. \tag{5}$$

Die Vernachlässigung der relativ kleinen Größe $18{,}5/K_0$ auf der rechten Seite von (1') führt zu Fehlern, die wesentlich kleiner bleiben als die durch ungenaue Temperaturangaben verursachten. Meist gilt $p/p_0 =$ konstant, so daß allein die $T$-Abhängigkeit verbleibt, die mit $\chi(T)/T$ berücksichtigt werden muß.
Stellt man (5) etwas um, so erkennt man, daß die relative Durchbruchsspannung (bezogen auf Kaltgasverhältnisse bei Normaldruck) durch einen einfachen Ausdruck bestimmt wird:

$$\frac{U_d}{E_{dJ0}\,d} \doteq \frac{1}{d}\int_0^d \frac{p}{p_0}\,\frac{T_0}{T}\,\chi(T)\,\mathrm{d}x, \text{ bzw. bei } n \text{ Stützpunkten} \tag{5'}$$

$$\doteq \frac{T_0}{p_0 n_d}\sum_1^{n_d}\frac{p(n)}{T(n)}\,\chi(n). \tag{5''}$$

Dr. sc. nat. *Ludwig Rothhardt* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Physikalisch-Technischen Institut der Akademie der Wissenschaften der DDR.

Rechenprogramme, die (5'') benutzen, liegen in FORTRAN („HLRDT 1Ø1") und in FOKAL („DREI3E") vor.
Einige Bemerkungen an dieser Stelle:

*Bemerkung 1:* Die in (2) auftretende Größe $K_0$ ist nicht im ganzen Temperaturbereich konstant. Sie bleibt aber bei den hier interessierenden Temperaturen auf Grund der Wirksamkeit negativer Ionen im heißen Gas genügend groß, so daß die vorgetragene Schlußweise bei Anwendung des verallgemeinerten Mittelwertsatzes der Integralrechnung erlaubt bleibt.

*Bemerkung 2:* Gleichung (5) darf nicht mehr in der hier dargestellten einfachen Form angewandt werden, wenn $\chi$ von der Vorgeschichte abhängt, d. h., Relaxationsvorgänge nicht vernachlässigt werden können.

*Bemerkung 3:* Positiv zu vermerken ist, daß die Rechenvorschrift (5) *nicht* die Kenntnis des gesamten $E(x)$- bzw. $E(n)$-Verlaufes verlangt. Der Aufwand bleibt also geringer als bei der (an sich gröberen) Schätzung ($E < E_{dJ}$?) für „jede Stelle".

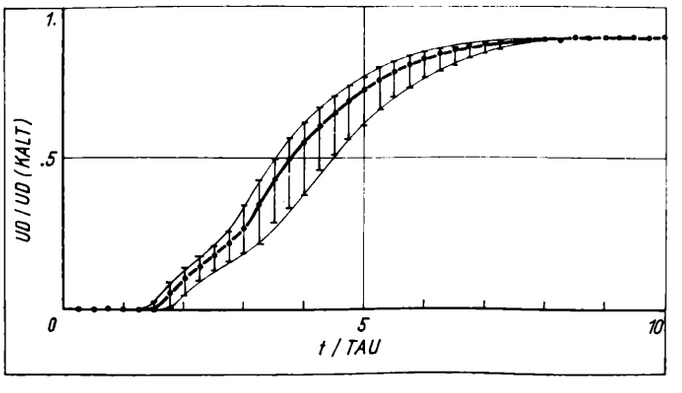
## 2. Schnelle zeitliche Änderungen ($SF_6$ als Schaltgas)

Bei schnellen Vorgängen, z. B. beim Abklingen des Bogenrestplasmas in Leistungsschaltern, ist thermische und chemische Relaxation nicht mehr vernachlässigbar. Zur Berechnung der zeitabhängigen elektrischen Festigkeit benötigt man dann prinzipiell Zeitreihen von Temperaturverteilungen $T(n, t)$ in engen Zeitschritten $\Delta t$. Darüber hinaus muß das chemisch relaxierende Gas vollständig in seiner Zeit- und Ortsabhängigkeit beschrieben werden (siehe z. B. [3]). Da $\bar{\alpha}$ für die auftretenden heißen Dissoziationsprodukte des $SF_6$ nicht genau bekannt ist, ist auch dann $U_d$ auf diesem Wege noch nicht berechenbar.
Auf der Basis der Modellrechnungen zum partiellen chemischen Gleichgewicht biatomarer Moleküle in abkühlenden $SF_6$-Dissoziationsprodukten [3] und der Zuordnung des Temperaturbereiches $T \geqq 2900$ K zu diesem chemischen Zustand [2] kann aber eine einfache Modellierungsvorschrift für thermisch schnell abklingendes dissoziiertes $SF_6$ gegeben werden. Dabei wird von einer Temperaturverteilung mit $T > 2900$ K zur Zeit $t = t_0$ ausgegangen, die noch nicht durch chemische Relaxation beeinflußt ist. Neben diesem $T(n, t_0)$ beschreibt eine durch äußere Bedingungen (Strömungsfeld, Elektroden, ...) verursachte Verteilung der thermischen Zeitkonstante TAU ($n$) und im Temperaturbereich der chemischen Relaxation, d. h. für $T \leqq 2900$ K, eine chemische Relaxationskonstante TAU1 den Verlauf des Abklingvorganges. Die Gastemperatur $TG$, die auch Gasdichte, freie Weglänge usw. bestimmt, klingt mit der Zeitkonstante TAU ab, während die durch TAU1 bestimmte „Temperatur" $T$ den chemischen Zustand des Gasgemisches beschreibt und über (4) den wirksamen $\chi$-Wert liefert. Anstelle von (5'') ergibt sich dann für die elektrische Festigkeit einer heißen, schnell abklingenden Gasstrecke

$$\frac{U_d(t)}{E_{dJ0}\,d} \doteq \frac{T_0}{p_0 n_d}\sum_1^{n_d}\frac{p(n,t)}{TG(n,t)}\,\chi(T(n,t)). \tag{5'''}$$

Der Zeitverlauf von $TG$ und $T$ errechnet sich in diesem hier vorgeschlagenen einfachen Modell nach Exponentialgesetzen mit der jeweils zugeordneten Zeitkonstante, wobei $TG$ auch stochastisch gestört sein kann [4]. Ein entsprechendes FORTRAN-Programm

**Bild 1.** Wiederverfestigungskurve eines turbulent axial angeströmten Schaltlichtbogens. Es ist die relative elektrische Festigkeit als Funktion der Zeit mit TAU als Zeiteinheit dargestellt.
Parameterwerte: LKORR/D = 0.5, TKORR/TAU = 4, XIEFF = 0.09; neben der Kurve für 50 %-Wahrscheinlichkeit des Durchbruchs sind die 5 %- und 95 %-Grenzkurven eingezeichnet.



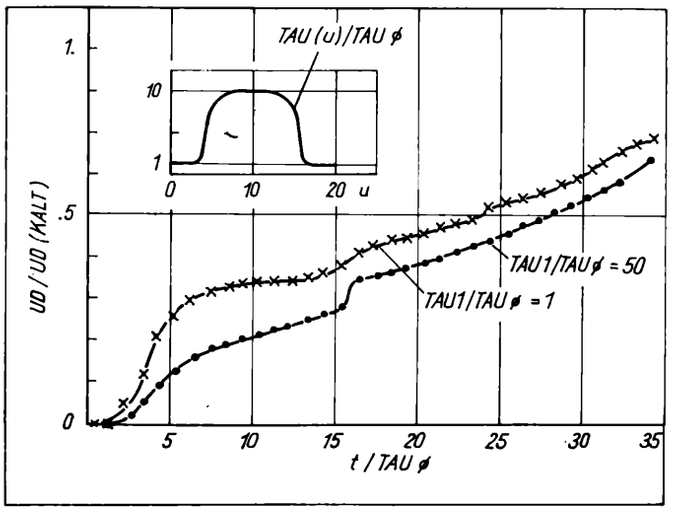



**Bild 2.** Wiederverfestigungskurve für eine Doppeldüsenanordnung bei Berücksichtigung der chemischen Relaxation. Für die im Einsatz dargestellte TAU($n$)-Verteilung wird von $T(t_0) = 10000$ K ausgehend für zwei Werte von TAU1/TAU∅ (d.h. der relativen Zeitkonstante der chemischen Relaxation) der Festigkeitsanstieg gegeben.

("HLRDT∅∅3"), das bei vorgegebenem $T(n, t_0)$, TAU($n$), TAU1 die Zeitverläufe $TG(t)$, $T(t)$ und $U_d(t)$ liefert, liegt vor.
Eine Bemerkung ist hier angebracht:
*Bemerkung 4:* Eine direkte Bestimmung von TAU1, d. h. einer Relaxationskonstante „von oben" (mit absinkender Temperatur), steht noch aus. Der eben gemachte Vorschlag bedarf daher einer Parameteranpassung. Er bietet aber gute Möglichkeiten für numerische Modellexperimente, wie dies im nächsten Abschnitt demonstriert wird.

## 3. Beispiele für Möglichkeiten der pm-Modellierung mit den hier vorgestellten Mitteln

An Hand einiger Beispiele soll abschließend gezeigt werden, wie eine (mehr oder weniger abgerüstete) physikalisch-mathematische Modellierung des Bogenrestplasmas in der Phase der dielektrischen Wiederverfestigung mit den hier bereitgestellten Mitteln erfolgen kann. Ziel ist entweder die Beurteilung des Wiederverfestigungsverlaufes unter konkret vorgegebenen Bedingungen oder die Beschaffung von Kenngrößen für entsprechende bb-Modelle [4b].

### 3.1. Kritische Spannung $U_d$ für ein bb-Modell

Der Zeitverlauf der kritischen Spannung kann für ein bb-Modell der dielektrischen Phase der Wiederverfestigung direkt mit Hilfe von (5") berechnet werden, wenn $TG(n, t_0)$ und TAU($n$) bekannt ist oder postuliert werden kann. Bis zu mittleren Leistungsniveaus kann $T := TG$ angenommen werden; für Hochleistungsschaltstrecken mit schneller zeitlicher Zustandsänderung muß TAU1 aus Prüfdaten entnommen oder ad hoc postuliert werden.

### 3.2. Modellierung turbulent axial beströmter Schaltlichtbögen

Denken wir z. B. an eine 1-Düsen-Anordnung mittlerer Leistung, so wird durch den Einfluß der Turbulenzelemente (mit endlicher Länge = LKORR und endlicher Lebensdauer bzw. Transitzeit = TKORR) lokal eine Schwankung der $P_0(n)$ und $\tau(n)$ hervorgerufen [4]. Einen solchen Bogen kann man als Reihenschaltung von D/LKORR Bogenstücken mit durch XI-Faktoren modifizierten TAU($n$)-Werten auffassen, die während der Zeit TKORR zeitlich konstant bleiben; $D$ = Elektrodenabstand. Er wird gestörte Festigkeitswerte aufweisen, deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen um einen Mittelwert (50 % Wahrscheinlichkeit des Durchbruchs) leicht berechnet werden können. Ein entsprechendes FORTRAN-Programm ("HLRDT ∅∅2") liegt vor. Bild 1 liefert ein Beispiel für praxisnahe Parameter LKORR/D = 0,5, d. h. bei einem Elektrodenabstand von 2 cm Turbulenzelemente der Größe 1 cm, TKORR/TAU = 4, d. h., die Störelemente existieren näherungsweise während des gesamten Kühlgastransits längs der Schaltstrecke, XIEFF = 0,09, typisch für stark turbulente Strömungen. Der Turbulenzeinfluß auf die Wiederverfestigung ist nicht zu übersehen.

### 3.3. Modellierung eines Doppeldüsenschalters hoher Leistung

Chemische Relaxation ist jetzt nicht mehr vernachlässigbar. Wir starten zur Zeit $t_0$ bei $T(n) = 10000$ K für alle $n$ mit einer TAU($n$)-Verteilung gemäß Bild 2 (Einsatz), die mit Hilfe einer Parabel 4, Grades dem Stagnationsbereich in der Mitte der Doppeldüse eine bis zu 10fach höhere thermische Zeitkonstante zuordnet. TAU1 wird als Parameter behandelt. Die Rechnung zeigt, daß bis zu TAU1 = 5 ✳ TAU der Einfluß der chemischen Relaxation nicht ins Auge fällt, sicher aber bei größeren TAU1. Im Bild 2 ist als Beispiel die Wirkung von TAU1 = 5∅ ✳ TAU dargestellt.
Numerische Untersuchungen wie die hier skizzierte erlauben die halbquantitative Diskussion experimenteller Ergebnisse von Doppeldüsenanordnungen aus [5]:

a) Stagnationsgebiete senken die Steilheit der Wiederverfestigungskurve in jedem Falle.
b) Ein Sattel in der Wiederverfestigungskurve wird durch Stagnationsgebiete nur sichtbar erzeugt, wenn die TAU($n_i$)-Werte mindestens um eine Größenordnung variieren und der Übergang an den zugehörigen Grenzen steil erfolgt.
c) Zusätzlich erzeugte Turbulenz kann die TAU-Werte im Stagnationsgebiet absenken und die Grenze verwischen.

Zum Schluß ist eine einschränkende Bemerkung angebracht:
*Bemerkung 5:* Falls (1) bereits über Teilgebieten im Inneren der Schaltstrecke erfüllt ist, erfolgt der nachfolgende totale Durchbruch wie bei Drei-Elektroden-Funkenstrecken und bedarf einer gesonderten Behandlung. Dies betrifft aber nur die Frühphase mit teilweise noch thermischer Strecke. Die nach (5) ermittelten Festigkeitswerte sind dann im allgemeinen zu pessimistisch.
*Bemerkung 6:* Als letzte Möglichkeit bleibt unter schwierigen Bedingungen aber immer folgende grobe Abschätzung gültig:

$$UD/UD\,(\mathrm{KALT}) \geqq \min_n \left( \frac{T G_0}{T G(n)} \chi(T(n)) \right). \qquad (6)$$

## Literatur


[1] *Mosch, W.; Hauschild, W.:* Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. Berlin: VEB Verlag Technik 1979
[2] *Rothhardt, L.; Maštovský, J.; Blaha, J.:* Dielectric strength of $SF_6$ at elevated temperatures. J. Phys. D: Appl. Phys. 14 (1981) L215 – L216
*Rothhardt, L.; Maštovský, J.; Blaha, J.:* Breakdown experiments in diluted $SF_6$ at elevated temperatures. J. Phys. D: Appl. Phys. (einger.)
[3] *Brand, K. P.; Kopainsky, J.:* Particle densities in a decaying $SF_6$ plasma. Appl. Phys. 16 (1978) 425 – 432
[4] *Rothhardt, L.:* Stochastische Modellierung des Schaltlichtbogens. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 2, S. 57 – 59. *Rothhardt, L.:* Modellierung des dielektrischen Wiederzündens vonbeströmten Leistungsschaltstrecken. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 9, S. 334 – 336
[5] *Schade, E.; Ragaller, K.:* Dielectric recovery period of axially blown $SF_6$-switchgear arcs. 7th Int. Conf. Gas Discharges, IEE, London 1982, Proceedings, 100 bis 103 EA 5533



*Noch lieferbar*

**Technologie des Elektroanlagenbaus**

Hochschullehrbuch

Von *W. Beyer; W. Löschner; K. Bödeker*
VEB Verlag Technik. 1. Auflage 1982. 380 Seiten, 177 Bilder, 82 Tafeln, Kunstleder 25,— Mark.

Bestell-Nr. 552 9389

Die Entwicklung und wissenschaftliche Durchdringung des technologischen Prozesses im Elektroanlagenbau ist eine wichtige Aufgabe von gesamtvolkswirtschaftlichem Interesse. Die von den Autoren herausgearbeitete spezielle Technologie des Elektroanlagenbaus trägt wesentlich dazu bei, die Phasen der Konstruktion, Projektierung des Errichtens und Betreibens von Elektroanlagen gezielt zu beeinflussen und damit einen durchgängig gestalteten Prozeß von der Auftragserteilung bis zur Inbetriebnahme von Elektroanlagen zu erreichen.

Die Redaktion

# Berechnung der Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion für Abnehmer in Elektroenergie-Verteilungsnetzen

**H. Rönsch, KDT; H. Bauch, KDT; Zittau**

## 1. Problemstellung

In [1] werden Wege zur Ausarbeitung von Zuverlässigkeitsnormativen für Mittelspannungs-Verteilungsnetze mit Nennspannungen bis 20 kV aufgezeigt. Als erste Stufe wird dabei die Normierung auf Grundlage von Erfahrungen der Vergangenheit vorgeschlagen. Die in [2] beschriebenen Kenngrößen sind für eine numerische Bewertung der Zuverlässigkeit von Elektroenergiesystemen und Netzen geeignet.

In [3] wird ein Verfahren, die sogenannte „Globalanalyse" beschrieben, mit der es möglich ist, aus den nach TGL 190-0002 im Störungsberichtsblatt A registrierten Daten die Unterbrechungsquote und Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion als Mittel über alle Abnahmepunkte des betrachteten Netzes zu bestimmen. Die „Globalanalyse" ist ihrem Wesen nach eine statistische Auswertung der im existierenden Netz, also am realen Objekt, beobachteten Störungen. Somit ist sie nur für die retrospektive numerische Bewertung der faktisch erzielten Zuverlässigkeit geeignet. Für Planungszwecke und für die selektive Untersuchung bestimmter Einflußfaktoren ist die mathematische Modellierung der zu untersuchenden Netze und der sich in ihnen abspielenden zuverlässigkeitsrelevanten Vorgänge erforderlich. Das gilt auch für die in [1] vorgeschlagene zweite Stufe der Normierung auf der Grundlage experimenteller Berechnungen.

Im Unterschied zu den vermaschten Übertragungs- und Verteilungsnetzen mit Nennspannungen über 20 kV wird in den Mittelspannungsverteilungsnetzen mit Nennspannungen $\leqq 20$ kV auf Grund ihrer besonderen Struktur und Betriebsweise die Zuverlässigkeit maßgeblich durch die Handlungen zur Störungseingrenzung und Wiederversorgung der Abnehmer durch Umschaltungen, die sich in der Unterbrechungsdauer widerspiegeln, bestimmt. Bei der mathematischen Modellierung sind also diese Handlungen ausreichend adäquat abzubilden.

Wie die Arbeiten von *Pruss* [4], *Brancert* [5] und *Dahl* [6] belegen, läßt sich das auf dem Weg der Partionierung der Unterbrechungsdauern recht gut bewerkstelligen.

Während die genannten Autoren sich auf die Bewertung der Zuverlässigkeit mit Hilfe der Erwartungswerte der Funktionsdauer und der infolge Störungen nicht gelieferten Energie orientieren, soll hier ein Verfahren vorgestellt werden, das es gestattet, die Verteilungsfunktion der Unterbrechungsdauer und die Unterbrechungsquote für jeden Abnahmepunkt zu berechnen.

*Smirnov* und *Pruss* beschreiben in [7] ein auf der Partionierung der Unterbrechungsdauer beruhendes Verfahren zur Berechnung der optimalen Strategie der Störungseingrenzung und Wiederzuschaltung. Als Optimierungskriterium verwenden sie die mittlere nicht gelieferte Energie. Mit der graphischen Darstellung des Ergebnisses als Entscheidungsbaum haben sie eine Möglichkeit gefunden, die von den ausführenden Operateuren zu verfolgende Strategie anschaulich und übersichtlich darzustellen. Da diese Darstellungsform für die Beschreibung jedes beliebigen Handlungsablaufes zur Störungseingrenzung geeignet ist, läßt sie sich nach einigen Modifikationen und Ergänzungen auch als Schema für die manuelle Berechnung der durch die verschiedenen möglichen Fehlerorte determinierten Unterbrechungsdauern für jeden Abnahmepunkt verwenden.

Aus diesen Unterbrechungsdauern lassen sich schließlich mit Hilfe der Störquoten für die Leitungsabschnitte und Schaltanlagen die gesuchten Verteilungsfunktionen berechnen. Mit Hilfe dieses Schemas lassen sich die Rechnungen für Einzelaufgaben mit vertretbarem Aufwand durchführen. Darüber hinaus erkennt der bearbeitende Ingenieur bereits bei der Aufstellung des Entscheidungsbaumes die Schwachstellen in der Struktur des Netzes und im Informationsfluß, denen bei der weiteren Zuverlässigkeitsarbeit besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist. Aus diesem Grunde wurde bei der Lösung der Aufgabe vorerst auf die Erarbeitung eines umfangreichen Rechenprogrammes verzichtet.

Dipl.-Ing. *Hannes Rönsch* war zur Zeit der Erarbeitung des Artikels wissenschaftlicher Assistent; Dr.-Ing. *Heinz Bauch* ist Dozent an der Sektion Elektroenergieversorgung an der IH Zittau.

## 2. Beschreibung des Rechenalgorithmus

Die Zuverlässigkeitsbewertung wird zunächst für jeden Leistungsschalterbereich getrennt durchgeführt. Grundprinzip ist es, für jeden Störungsort, d. h. für jeden abtrennbaren Systemabschnitt die Unterbrechungsdauer eines jeden Abnahmepunktes des Leistungsschalterbereiches zu berechnen. Grundlage für diese Berechnung bilden die nach *Pruss* definierten partiellen Unterbrechungsdauern, die für die Belange der Energieversorgung der DDR modifiziert wurden. Die Zerlegung des Handlungsablaufes zur Störungsbeseitigung wird in folgender Weise vorgenommen:

1. Informationsgewinnung der Netzbefehlsstelle (NBS) über den Störungsort
2. Informationsübertragung von der NBS an die Basisoperateure
3. Herstellen der Handlungsbereitschaft durch die Basisoperateure
4. Fahrt der Basisoperateure zum ersten Handlungsort
5. Informationsgewinnung am ersten Handlungsort
6. Eingrenzung des Störungsortes durch die Basisoperateure
7. Freischaltung des gestörten Systemabschnittes
8. Wiederzuschaltung von Abnahmepunkten unter Umgehung des gestörten Systemabschnittes
9. Reparatur des gestörten Systemabschnittes und Wiederzuschaltung der restlichen Abnahmepunkte.

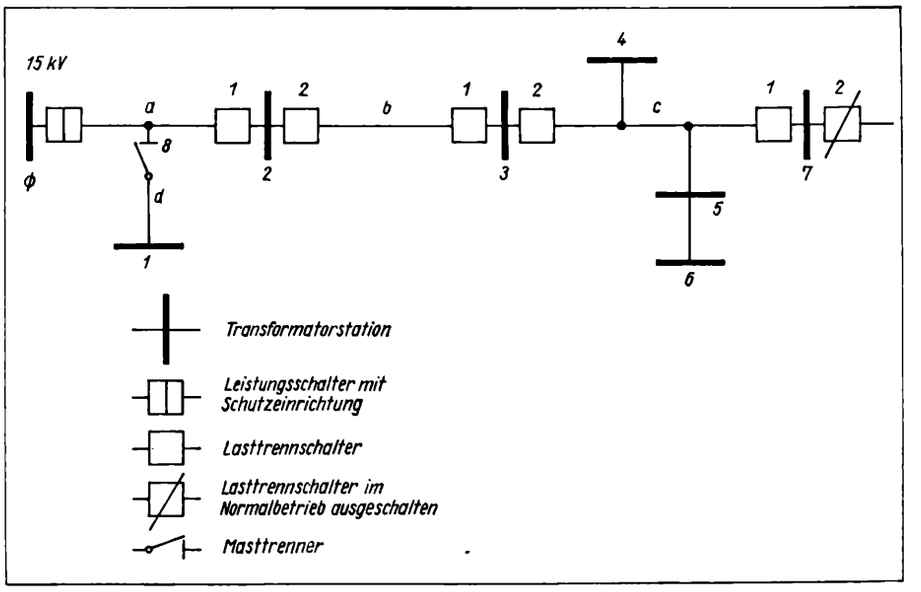
Die Handlungen 1 bis 4 sind unabhängig vom gestörten Systemabschnitt, sie werden nur durch die vorhandenen Informationsmittel und die Betriebsorganisation bestimmt. Die für die konkreten Bedingungen ermittelten partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u1}$ bis $t_{u4}$ werden aufsummiert. Durchgeführte Untersuchungen in einigen Energiekombinaten erbrachte das Ergebnis, daß es für diese Teilhandlungen möglich ist, neben den Erwartungswerten $E(t_{u1})$ bis $E(t_{u4})$ auch deren Verteilungsfunktionen $G(t_{u1})$ bis $G(t_{u4})$ anzugeben. Daraus läßt sich die resultierende Verteilungsfunktion $G(t_{u1-4})$ bestimmen, die die wirklichen Verhältnisse mit hoher Abbildgüte wiedergibt. Der Störungsbeseitigungsprozeß nach Erreichen des gestörten Leistungsschalterbereiches wird durch den konkret gestörten Systemabschnitt bestimmt. Dabei ist die angewendete Störungssuch- und Wiederversorgungsstrategie zu berücksichtigen. Bei den meisten Strategien ist es nicht möglich, die Teilhandlungen *5* bis *8* exakt zu trennen. Oft erweist es sich als sinnvoll, einzelne Abnehmergruppen noch vor der endgültigen Lokalisation des gestörten Systemabschnittes durch Umschaltung wiederzuversorgen. Aus diesem Grund ist es nicht zweckmäßig und vielfach auch nicht möglich, die entsprechenden partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u5}$ bis $t_{u8}$ getrennt zu bestimmen. Zur Ermittlung des Zeitbedarfes für die Teilhandlungen *5* bis *8* wird der entsprechende Handlungsablauf auf Grundlage von Elementarhandlungen für jeden gestörten Systemabschnitt modelliert. Der Entscheidungsbaum dient dabei zur Ermittlung der partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u5}$ bis $t_{u8}$ für jeden Abnahmepunkt $k$ bei jeder möglichen Systemabschnittsstörung $j$. Als Ergebnisform wird eine Matrix $T_{u5-8jk}$ gewählt, aus der sich dann leicht unter Zugrundelegung einer zweckmäßigen Klassenteilung $i$ die Verteilungsfunktionen der partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u5-8}$ für jeden Abnahmepunkt

$$G_k(t_{u5-8_i}) = \frac{1}{h_s} \sum_{i=1}^{l} \sum_{j=1}^{m} (h_{sijk} \mid t_{u5-8_j} \leqq t_{u5-8_i}) \qquad (1)$$

berechnen lassen. Dabei sind $h_s$ die Störquote des Leistungsschalterbereiches, $i$ die Unterbrechungsdauerklasse, $j$ die Nummer des Systemabschnittes, $h_{sijk}$ die Störquote des $j$-ten Systemabschnittes, die für den $k$-ten Abnahmepunkt eine partielle Unterbrechungsdauer $t_{u5-8}$ der $i$-ten Klasse nach sich zieht.

Durch Überlagerung mit den vorher bestimmten partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u1-4}$ sowie $t_{u9}$ erhält man die Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion für jeden Abnahmepunkt $G_k(t_u)$. Entsprechend der speziellen Fragestellung der Untersuchung können daraus die mittleren Verteilungsfunktionen der Unterbrechungsdauer für näher zu bezeichnende Abnehmergruppen gebildet werden. Als Merkmale können dabei solche struktureller oder gerätetechnischer Art, aber auch z. B. belastungsspezifische, von Inter-

**Bild 1.** Leistungsschalterbereich des Demonstrationsbeispiels




**Tafel 1. Leitungslängen der abtrennbaren Systemabschnitte**

| | |
|---|---|
| *a* | 3 km |
| *b* | 2 km |
| *c* | 8 km |
| *d* | 2 km |
| *a*–*d* | 15 km |

**Tafel 2. Wegeentfernungen zwischen den Systempunkten (in km)**

| | Ø | 8 | 2 | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 2 | – | | | |
| 2 | 3 | 1 | – | | |
| 3 | 5 | 3 | 2 | – | $\underline{S} = (s_{mn})$ |
| 7 | 9 | 7 | 6 | 4 | |

esse sein. Schließlich wird es in vielen Fällen von Interesse sein, daß man die mittlere Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion über alle Abnahmepunkte des betrachteten Leistungsschalterbereiches berechnet.

## 3. Demonstrationsbeispiel

Im folgenden soll an einem einfachen Beispiel der Algorithmus zur Berechnung der Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion erläutert werden. Gegeben sei der Leistungsschalterbereich eines 15-kV-Freileitungsnetzes gemäß Bild 1. Der im unbesetzten Umspannwerk Ø installierte Überstromzeitschutz wird durch die Netzbefehlsstelle fernüberwacht. Die in die Hauptleitung eingeschleiften Transformatorstationen *2*, *3* und *7* sind mit Lasttrennschaltern ausgerüstet und enthalten keine weiteren Informationsmittel (wie z. B. Kurzschlußanzeiger). Der Lasttrennschalter *2* der Station *7* ist im Normalbetrieb ausgeschaltet. Mit ihm wird die Reserveeinspeisung realisiert. Die Stichleitung zur Station *1* ist über einen Masttrenner an die Hauptleitung im Punkt *8* angeschlossen. Die Maststationen *4*, *5* und *6* werden über Stichleitungen direkt von der Hauptleitung versorgt. Die Leitungslängen der abtrennbaren Systemabschnitte *a* bis *d* sind in der Tafel 1 angegeben. Tafel 2 enthält die Wegeentfernungen zwischen den Systempunkten. Unter Zugrundelegung einer mittleren Fahrgeschwindigkeit $\bar{v}$ wird aus der Wegematrix $S_B$ (Tafel 2) die Bewegungsdauermatrix $T_B$ (Tafel 3) berechnet:

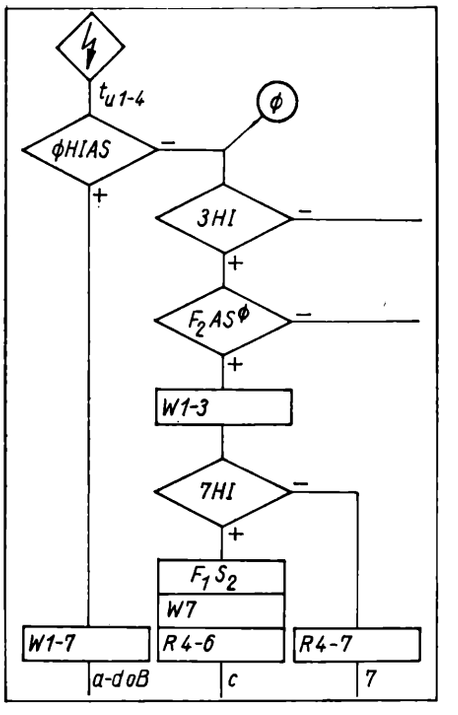
$$t_B = s_B/\bar{v} + t_{BC} \qquad (2)$$

Der Therm $t_{BC}$ beinhaltet einen konstanten Anteil der Bewegungsdauer, der durch den Anfahr- und Haltevorgang des Fahrzeuges verursacht wird. Den Elementarhandlungen werden die Symbole und Elementarhandlungsdauern entsprechend Tafel 4 zugeordnet. Das Ergebnis einer Prüfung wird im Entscheidungsbaum durch + oder — symbolisiert. Dabei bedeutet

\+ geprüfte Systemabschnitte sind fehlerfrei (erfolgreiche Probeschaltung, visuelle Fehlerfreiheit, erfolgreiche Isolationsprüfung).
— geprüfte Systemabschnitte sind fehlerbehaftet.

Die Wiederversorgung von Abnahmepunkten durch Umschaltung wird durch ein vorangestelltes *W* vor die entsprechenden Nummern der Abnahmepunkte symbolisiert. Abnahmepunkte, die erst nach Reparatur des fehlerbehafteten Systemabschnittes wiederversorgt werden können, werden durch ein vorangestelltes *R* im Entscheidungsbaum gekennzeichnet. Der Aufbau des Entscheidungsbaumes geschieht wie folgt (siehe Bild 2):
Das Startsymbol kennzeichnet die Schutzauslösung des betrachteten Leistungsschalterbereiches. Nach Ablauf der Teilhandlungen *1* bis *4* mit den partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u1}$ bis $t_{u4}$ befinden sich die Basisoperateure in dem mit UKW-Sprechfunk ausgestatteten Fahrzeug am Umspannwerk Ø, betreten dieses (*H*), informieren sich (*I*) (z. B. Ablesen der Relais-Ansprechdaten), führen einen Informationsaustausch mit der Netzbefehlsstelle durch (*A*) und erhalten von dieser die Anweisung zur Durchführung eines Schaltversuches mit dem ausgelösten Leistungsschalter (*S*). Ist diese Versuchsschaltung erfolgreich (+), werden die Transformatorstationen

**Bild 2.** Aufbau des Entscheidungsbaumes – Teil 1




*1* bis *7* wiederversorgt (*W 1—7*). Es lag eine Störung ohne beschädigte Betriebsmittel vor, die im allgemeinen den Freileitungsabschnitten zugeordnet werden kann (*a—d oB*). War die Versuchsschaltung erfolglos (—), so verbleibt ein Basisoperateur zur Ausführung weiterer Probeschaltungen im Umspannwerk Ø (Symbol Ø). Der zweite Operateur fährt zur Station *3*, betritt diese (*H*) und führt eine Sichtkontrolle durch (*I*). Wird kein Fehler festgestellt (+), schaltet er den Lasttrennschalter *2* aus ($F_2$), meldet dies der Netzbefehlsstelle und diese gibt die Anweisung an den Operateur im Umspannwerk Ø ) (*A*), eine Probeschaltung ($S^{\varnothing}$) durchzuführen. Ist diese erfolgreich (+), so sind die Transformatorstationen *1* bis *3* wiederversorgt (*W 1—3*). Nun fährt der Basisoperateur von Station *3* zur Station *7*, betritt diese (*H*) und führt wiederum eine Sichtkontrolle aus (*I*). Ist sie erfolgreich (+), schaltet er den Lasttrennschalter *1* aus ($F_1$) und schließt die normal offene Stelle ($S_2$). Somit ist Station *7* wiederversorgt (*W 7*). Es liegt eine Störung mit beschädigtem Betriebsmittel des Systemabschnittes *c* vor. Die Transformatorstationen *4* bis *6* können erst nach dessen Reparatur wiederversorgt werden (*R 4—6*). Für den Fall, daß die Sichtkontrolle in Station *7* eine Störung offenbart, kann Station *7* ebenfalls erst nach Abschluß der Reparatur wiederversorgt werden (*R 4—7*).
Der weitere Aufbau des Entscheidungsbaumes wird aus Bild 3 ersichtlich. Zu beachten ist, daß für jeden gestörten Systemabschnitt

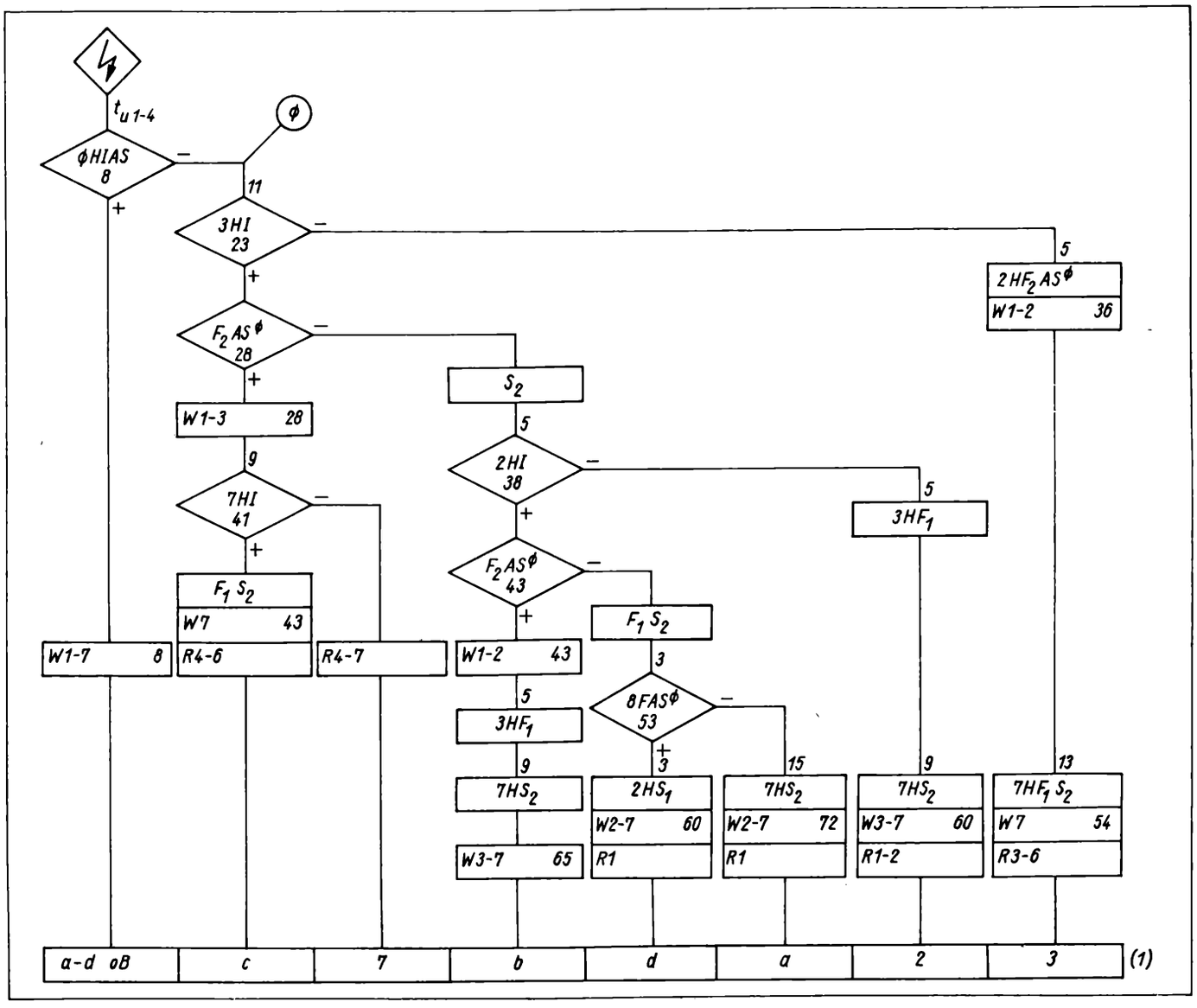



**Bild 3.** Aufbau des Entscheidungsbaumes – Teil 2

**Bild 4.** Aufbau des Entscheidungsbaumes – Teil 3 ▼

| | a-d oB | c | 7 | b | d | a | 2 | 3 | Σ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $h_{sj}$ /a$^{-1}$ | 1,110 | 0,592 | 0,004 | 0,148 | 0,148 | 0,222 | 0,004 | 0,004 | 2,232 | (2) |
| $RH_{sj}$ | 0,497 | 0,265 | 0,002 | 0,066 | 0,066 | 0,100 | 0,002 | 0,002 | | (3) |
| k = 1 | 8 | 28 | 28 | 43 | R | R | R | 36 | | |
| 2 | 8 | 28 | 28 | 43 | 60 | 72 | R | 36 | | |
| 3 | 8 | 28 | 28 | 65 | 60 | 72 | 60 | R | | (4) |
| 4-6 | 8 | R | R | 65 | 60 | 72 | 60 | R | | |
| 7 | 8 | 43 | R | 65 | 60 | 72 | 60 | 54 | | |

(1)

**Tafel 3. Bewegungsdauern zwischen den Systempunkten (in Minuten)**

| | ø | 8 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| 8 | 5 | – | | |
| 2 | 7 | 3 | – | |
| 3 | 11 | 7 | 5 | – |
| 7 | 19 | 15 | 13 | 9 |

$\underline{T_B} = (tB_{nm})$
$t_{Bmn} = s_{mn}/\overline{v} + t_{BC}$
$\overline{v} = 30$ km/h
$t_{BC} = 1$ min

die gleiche Strategie der Störungssuche und Wiederversorgung angewendet wird. Nachdem der Entscheidungsbaum für alle Störungsfälle erstellt ist, werden die Fahrzeiten zwischen den Handlungsorten entsprechend Tafel 3 an die Verbindungslinien zwischen den Handlungsorten angetragen. Im nächsten Schritt werden die partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u\,5-8}$ für jeden infolge Wiederzuschaltung bzw. Umschaltung wiederversorgten Abnahmepunkt ($W$) durch Summation der entsprechenden Elementarhandlungsdauern (nach Tafel 4) und Fahrdauern ermittelt und im Entscheidungsbaum in die entsprechenden Felder eingetragen (siehe Bild 3). Zweckmäßigerweise notiert man die Zwischenergebnisse an den Entscheidungspunkten (⟨⟩). Unter die Zeile der gestörten Systemabschnitte (1) im Bild 3 werden auf Grundlage der aus der Störungsstatistik entnommenen Störquoten (Tafel 5) die Erwartungswerte der jährlichen Störungshäufigkeit $h_{sj}$ der Systemabschnitte $j$ (2) eingetragen (Bild 4). In Zeile 3 dieses Bildes sind die relativen Störungshäufigkeiten der Systemabschnitte des betrachteten Lei-

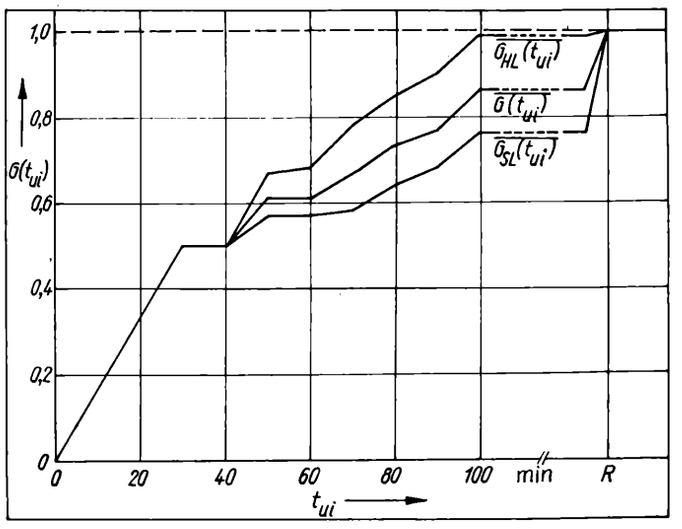



**Bild 5.** Mittlere Unterbrechungsdauer – Verteilungsfunktionen

stungsschalterbereiches $RH_{sj}$ ausgewiesen. Die im Entscheidungsbaum für jeden Abnahmepunkt ermittelten partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u\,5-8}$ werden in der darunter befindlichen Matrix (4) zusammengestellt. Reparaturdauern sollen an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Sie werden in der Matrix durch den Buchstaben $R$ symbolisiert. Aus dieser Matrix der partiellen Unterbrechungsdauern $T_{u\,5-8}$ können nun für jeden Abnahmepunkt unter Berücksichtigung der relativen Störungshäufigkeiten der Systemabschnitte $RH_{sj}$ die Verteilungsfunktionen der Unterbrechungsdauer berechnet werden. Dabei werden die partiellen Unterbrechungsdauern der Matrix in zweckmäßig gewählte Zeitklassen eingeordnet (Tafel 6).

Liegen die partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u1}$ bis $t_{u4}$ als Erwartungswerte vor, so verschiebt sich die aus dem Entscheidungsbaum berechnete partielle Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion $G\,(t_{u\,5-8})$ um den Wert $E\,(t_{u\,1-4})$ nach rechts und man erhält somit die Verteilungsfunktion der Unterbrechungsdauer für den entsprechenden Abnahmepunkt. Im Falle des Vorliegens von Verteilungsfunktionen für die partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u1}$ bis $t_{u4}$ kann die Überlagerung mit der partiellen Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion $G\,(t_{u\,5-8})$ zur Unterbrechungsdauer-Verteilung $G\,(t_u)$ maschinell auf numerischen Wege durchgeführt werden. Eine Überlagerung auf analytischem Wege über Faltungsintegrale ist meist nicht sinnvoll, da insbesondere die Überführung der Verteilungsfunktion $G\,(t_{u\,5-8})$ in eine geschlossene analytische Form zusätzliche Näherungen bedingt und somit die Aussagefähigkeit der Verteilungsfunktion schmälern kann. Aus den Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktionen der Abnahmepunkte können entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung, wie oben ausgeführt, mittlere Verteilungsfunktionen für Gruppen von Abnahmepunkten berechnet werden. In der Tafel 7 wurden für das Beispielnetz die mittleren Verteilungsfunktionen für die in die Hauptleitung eingeschleiften Stationen *2*, *3* und *7*, für die im Stich versorgten Stationen *1*, *4*, *5* und *6* sowie die mittlere Verteilungsfunktion für den gesamten Leistungsschalterbereich berechnet. Dabei wurde für die partiellen Unterbrechungsdauern $t_{u1}$ bis $t_{u4}$ ein Erwartungswert $E\,(t_{u\,1-4}) = 20$ min zugrunde gelegt. Die graphische Darstellung dieser Verteilungsfunktionen zeigt Bild 5.

**Tafel 4. Elementarhandlungen, deren Symbole und Dauern**

| Elementarhandlung | Symbol | Dauer/min |
|---|---|---|
| Betreten und Verlassen eines Handlungsortes | $H$ | 3 |
| Informationsaustausch zwischen Basisoperateur und Netzbefehlsstelle | $A$ | 3 |
| Informationsgewinnung | $I$ | 1 |
| Ausschalten bzw. Öffnen eines Schaltgerätes | $F$ | 1 |
| Einschalten bzw. Schließen eines Schaltgerätes | $S$ | 1 |

| | |
|---|---|
| Ziffer | – alle nachfolgenden Elementarhandlungen beziehen sich auf diesen Handlungsort. |
| Hochgestellter Index | – Nr. des Handlungsortes, wenn er nicht mit dem der übrigen im Feld eingetragenen Handlungen übereinstimmt. |
| Tiefgestellter Index | – Nr. des Schaltgerätes, wenn am Handlungsort mehrere vorhanden sind. |

**Tafel 5. Störquoten für Systemelemente des Beispielnetzes**

| Systemelement | $h_s$ |
|---|---|
| Freileitung mit Beschädigung | 0,048 (a km)$^{-1}$ |
| Freileitung ohne Beschädigung | 0.074 (a km)$^{-1}$ |
| Transformatorstation | 0,004 $a^{-1}$ |

Die Unterbrechungsquote eines Abnahmepunktes $k$ wird durch Summation der Erwartungswerte der jährlichen Störungshäufigkeit $h_{sj}$ der Systemabschnitte $j$ (Bild 4, Zeile 2) berechnet, die zur Unterbrechung der Versorgung dieses Abnahmepunktes führen:

$$h_{uk} = \sum_j h_{sjk} \tag{3}$$

Daraus lassen sich mittlere Unterbrechungsquoten für Gruppen von $n$ Abnahmepunkten bestimmen:

$$\overline{h_u} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} h_{uk} \text{ (Tafel 7, letzte Spalte).} \tag{4}$$

Die Angabe der Unterbrechungsquote für jeden der $k$ Abnahmepunkte ist besonders dann von Interesse, wenn das zu untersuchende Teilnetz aus mehreren Schutzabschnitten besteht.

**Tafel 6. Verteilungsfunktionen der partiellen Unterbrechungsdauer $t_{u\,5-8}$ und Unterbrechungsquoten für die Abnahmepunkte $k$**

| $u\,5-8_i$/min | 0–10 | 10–20 | 20–30 | 30–40 | 40–50 | 50–60 | 60–70 | 70–80 | 80-$R$ | $h_{uk}/a^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k = 1$ | 0,50 | 0,50 | 0,76 | 0,77 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 1,00 | 2,232 |
| $k = 2$ | 0,50 | 0,50 | 0,76 | 0,77 | 0,83 | 0,90 | 0,90 | 0,99 | 1,00 | 2,232 |
| $k = 3$ | 0,50 | 0,50 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,83 | 0,90 | 0,99 | 1,00 | 2,232 |
| $k = 4-6$ | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,57 | 0,63 | 0,73 | 1,00 | 2,232 |
| $k = 7$ | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,76 | 0,83 | 0,90 | 0,99 | 1,00 | 2,232 |

**Tafel 7. Mittlere Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktionen und Unterbrechungsquoten**

| $t_{ui}$/min | 0–30 | 30–40 | 40–50 | 50–60 | 60–70 | 70–80 | 80–90 | 90–100 | 100-$R$ | $\overline{h_u}/a^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\overline{G_{HL}(tui)}$ | 0,50 | 0,50 | 0,67 | 0,68 | 0,78 | 0,85 | 0,90 | 0,99 | 1,00 | 2,232 |
| $\overline{G_{SL}(t_{ui})}$ | 0,50 | 0,50 | 0,57 | 0,57 | 0,58 | 0,64 | 0,68 | 0,76 | 1,00 | 2,232 |
| $\overline{G(t_{ui})}$ | 0,50 | 0,50 | 0,61 | 0,61 | 0,67 | 0,73 | 0,77 | 0,86 | 1,00 | 2,232 |

## 4. Bemerkungen zur Anwendung

Der hier beschriebene Algorithmus zur Bestimmung der Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion besteht auf einer ereignisorientierten Modellierung. Er gestattet, die Auswirkung von Einzelstörungen und Folgen von Einzelstörungen mit hinreichend großem Störungsabstand auf die angeschlossenen Abnahmepunkte zu bewerten. Als Anfangsbedingung für jedes modellierte Ereignis wird stets das stationäre Verharren des Systems im zu definierenden Normalbetrieb vorausgesetzt. Diese Voraussetzung trifft in Mittelspannungs-Verteilungsnetzen für die Mehrzahl der Störungen zu, da allgemein gilt:

$$\mu_j \gg \lambda_j \tag{5}$$

$\mu_j$ Reparaturrate eines Systemelementes $j$

$\lambda_j$ Ausfallrate eines Systemelementes $j$

Weiterhin ist bedingt durch die offene Fahrweise der Mittelspannungs-Verteilungsnetze die Unterbrechungsquote infolge von Einzelstörungen um ein Vielfaches größer als die durch Mehrfachstörungen verursachte. Der Einfluß von zeitabhängigen Systemgrößen, wie

- Tages- und Jahresgang der Belastung der Abnahmepunkte und damit der effektiven Umschaltmöglichkeiten
- jahreszeitliche Abhängigkeit der Störquoten von Systemelementen bedingt durch Umwelteinflüsse sowie
- Unterschiede in der Betriebsorganisation in Abhängigkeit von der Tageszeit (Bereitschaftsdienste)

kann durch getrennte Rechnungen ohne großen Aufwand untersucht werden. Eine geschlossene Bewertung solcher Einflußfaktoren erfordert eine prozeßorientierte Modellierung z. B. auf Grundlage der Monte-Carlo-Simulation. Der damit verbundene hohe rechentechnische Aufwand (Einsatz eines Großrechners, Datenaufbereitung) erscheint für die Beantwortung einer Vielzahl von Fragen nicht gerechtfertigt, und ist für ingenieurtechnische Untersuchungen unmittelbar in der Praxis auch wenig geeignet.

# Berechnung relevanter Zuverlässigkeitskenngrößen für die Übertragung von Netzschutzsignalen

**Th. Winkler, Karl-Marx-Stadt**

## 1. Ausgangspunkt und Ziel der Untersuchung

Zur Gewährleistung einer hohen Übertragungssicherheit von Netzschutzsignalübertragungsanlagen für die Elektroenergieversorgung werden mehrere parallele Übertragungskanäle eingerichtet, da sowohl irrtümliche Schutzauslösungen als auch nicht erfolgte Auslösungen zu Ausfällen der Elektroenergieversorgung und hohen Folgekosten führen können. Ein zu übertragendes Signal wird gleichzeitig in alle $n$ Kanäle eingegeben und in jedem Kanal unabhängig von den anderen Kanälen übertragen. Diese Übertragung erfolgt unzuverlässig, d. h., es wird möglicherweise ein Signal nicht übertragen oder es wird ein nicht abgesendetes Signal irrtümlich empfangen. Am Ausgang der Kanäle wird ein Vergleich durchgeführt; ein Signal gilt als empfangen, wenn es in mindestens $m$ der $n$ Kanäle empfangen wurde. Im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie liegt somit ein $m$-aus-$n$-System vor. Weiterhin handelt es sich um ein System mit Reparatur, da die Unterbrechungen, welche Signalübertragungen verhindern, und die Fehlauslösungen nur eine gewisse Zeit andauern und die entsprechenden Kanäle anschließend wieder voll funktionsfähig sind.

Ziel der Untersuchung ist die Berechnung verschiedener Kenngrößen des Systems, welche bestimmte Aspekte der Übertragungssicherheit kennzeichnen, wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, mittlere Anzahl von Störungen je Jahr.

Die Lösung erfolgt über die Beschreibung des Systemverhaltens durch einen homogenen Markov-Prozeß (vgl. Abschn. 3). Dabei wird hier das derzeit in der Praxis verwendete 2-aus-3-System untersucht, eine Übertragung der Berechnungsverfahren auf andere Systeme ist leicht möglich.

Die Anwendungen der Ergebnisse erfolgt in zwei Richtungen:

— Bestimmung der Kenngrößen konkreter Systeme ausgehend von der Auswertung der Störungsunterlagen für die einzelnen Kanäle
— Vorausbestimmung der Kenngrößen angenommener Systeme und daraus Ableitung von Zuverlässigkeitsforderungen an die Kanäle zum Erreichen von geforderten Systemwerten.

Dr. rer. nat. *Thomas Winkler* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften der DDR.
Die Ausarbeitung basiert auf einem Forschungsthema, das im Auftrag des VE Kombinates Verbundnetze Energie durchgeführt wurde.

## Literatur

[1] *Bauch, H.:* Zur Ausarbeitung von Zuverlässigkeitsnormativen für Mittelspannungs-Verteilungsnetze mit Nennspannungen bis 20 kV. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 1, S. 15 – 19

[2] *Bauch, H.:* Zur numerischen Bewertung der Zuverlässigkeit von Elektroenergiesystemen und Netzen. Energietechnik, Leipzig 31 (1981) 1, S. 1 – 5

[3] *Lindner, H.:* Verfahren zur numerischen Bewertung der in Mittelspannungsnetzen gewährleisteten Versorgungszuverlässigkeit. ELEKTRIE, Berlin 31 (1977) 6, S. 286 – 293

[4] *Pruss, V. L.:* Rascet obespečennosti elektro-snabženijem potrebitelej podključennych k raspredlitel'nym elektrosetjam. Električeskie stanzii (1971) 12, S. 10 bis 15

[5] *Brancart, D.; Deuse, M.; Van Geert, E.:* Consideration of Service Continuity in MV Distribution Network Planning. Dokument Nr. 4.2 der Internationalen Konferenz für Elektroenergieverteilung. IEE Conf. Publ. Nr. 151, CIRED London

[6] *Dahl, E.; Huse, J.:* The Level of Continuity of Elektricity Supply and Consequent Financial Implications. Dokument Nr. 4.4. der Internationalen Konferenz für Elektroenergieverteilung. IEEE Conf. Publ. Nr. 151, CIRED London 1977

[7] *Smirnov, A. I.; Pruss, V. L.:* Optimisazija pereključenij pri avarijach v raspredelitel'nych setjax. Električeskie stanzii (1980) S. 39 – 42

EA 5273

Um auch der Forderung nach einfach handhabbaren Berechnungsverfahren zu genügen, werden neben dem relativ komplizierten genauen Modell für das Übertragungssystem verschiedene einfachere Näherungsmodelle konstruiert (vgl. Abschn. 4). Die Näherungslösungen ermöglichen die Abschätzung des Einflusses jeder einzelnen Störungsart und die Abschätzung der Kenngrößen des Systems durch Zugrundelegen der Werte des unzuverlässigsten bzw. des zuverlässigsten Kanals.

## 2. Beschreibung des mathematischen Modells und des Lösungsverfahrens

### 2.1. Modellannahmen

a) Funktionsweise des Systems:

— Das System besteht aus drei (unterschiedlichen) Kanälen in 2-aus-3-Schaltung, d. h., es ist gestört, wenn mehr als ein Kanal gestört ist.
— Eine Störung eines Kanals bedeutet entweder eine Fehlauslösung ($FA$), d. h. den Empfang eines Signals, obwohl keines abgesendet wurde, oder eine Unterbrechung ($U$), die eine eventuell notwendige Übertragung eines Signals verhindern würde.

b) Fehlauslösungen:

— Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden $FA$ des $i$-ten Kanals ($i = 1, 2, 3$) ist eine exponentialverteilte Zufallsgröße mit dem Verteilungsparameter $a_i$, d. h., sie besitzt die Verteilungsfunktion $F(t) = 1 - \exp(-a_i t)$. Als mittlere Anzahl von $FA$ je Zeiteinheit ergibt sich bekanntermaßen der Wert $a_i$, er wird im folgenden als Störungsrate bezeichnet.
— Die Dauer einer $FA$ ist eine exponentialverteilte Zufallsgröße mit dem Verteilungsparameter $b$. Die mittlere Dauer einer $FA$ beträgt demzufolge $1/b$. Der Wert $b$ wird analog zur Störungsrate als Reparaturrate bezeichnet.

c) Unterbrechungen:

— Eine Unterbrechung stellt entweder eine Kurzunterbrechung ($KU$) oder eine Langunterbrechung ($LU$) dar (in der Praxis wird z. B. zwischen Unterbrechungen bis 2 Minuten Dauer und längeren Unterbrechungen unterschieden)
— Der Abstand zwischen zwei $KU$ des $i$-ten Kanals ist eine exponentialverteilte Zufallsgröße mit dem Parameter $k_i$ (der Störungsrate der $KU$), die Dauer einer $KU$ ist exponentialverteilt mit dem Parameter $m_i$ (der Reparaturrate der $KU$).
— Der Abstand zwischen zwei $LU$ und die Dauer einer $LU$ des $i$-ten Kanals sind exponentialverteilte Zufallsgrößen mit der Störungsrate $l_i$ und der Reparaturrate $n_i$.

d) Zur Berechtigung der Annahmen:

Für die Annahme der Exponentialverteilung gibt es teilweise sachlogische Gründe (keine Abnutzungs- und Alterungsprozesse), außerdem kann sie durch statistische Testverfahren überprüft werden. Die Einbeziehung nichtexponentialverteilter Größen erfordert einen großen modelltechnischen und numerischen Aufwand, der bei den vorhandenen ungenauen Eingangsdaten nicht gerechtfertigt ist. Haben die Variationskoefffizienten der Zufallsgrößen Werte kleiner als Eins, so erhält man außerdem unter obiger Annahme Abschätzungen der Kenngrößen nach der sicheren Seite.

### 2.2. Prinzip des Lösungsverfahrens

*1. Schritt:*

Beschreibung des Systemverhaltens durch einen homogenen Markov-Prozeß mit stetiger Zeit.

Dazu werden folgende Bestimmungsstücke benötigt:

— Menge der möglichen Systemzustände $M = \{1, 2, \ldots N\}$
— Matrix der Übergangsraten $\Lambda = (\lambda_{ji})_{j,i \in M}$
— Vektor der Anfangsverteilung $p = (p_j(0))_{j \in M}$.

Die Zustände des Prozesses unterscheiden sich dabei durch die Anzahl der gestörten Kanäle und die Art der Störung des jeweiligen Kanals. Die Übergangsraten von einem Zustand in einen anderen ergeben sich aus den einzelnen Störungs- und Reparaturraten. Für das genaue Modell und für jedes Näherungsmodell wird auf diese Weise ein zugehöriger Markov-Prozeß konstruiert (vgl. Abschn. 4).

*2. Schritt:*

Berechnung der Zuverlässigkeitskenngrößen durch Untersuchung der zufälligen Verweildauer in der Zustandsteilmenge $A = \{1, \ldots N_1\}$ der funktionsfähigen Systemzustände und der Teilmenge $B = \{N_1 + 1, \ldots N\}$ der Zustände, die einer Systemstörung entsprechen.

Für die stationäre Phase des Prozesses, in der die Kenngrößen nicht mehr vom Startzustand abhängen, werden berechnet:

$m_B$ mittlere Dauer einer Störung des Systems
$m_A$ mittlerer Abstand von der Beendigung einer Systemstörung bis zum Beginn der nächsten (mittlere Dauer einer Arbeitsperiode)
$EN(t)$ mittlere Anzahl von Systemstörungen in $t$ Zeiteinheiten
$V$ Verfügbarkeit.

Für die instationäre Phase (Einschwingphase) des Prozesses werden unter der Annahme, daß zum Startzeitpunkt keine Störung vorliegt, folgende Kenngrößen ermittelt:

$R(t)$ Zuverlässigkeit, d.h. Wahrscheinlichkeit dafür, daß im Zeitraum $[0, t]$ keine Systemstörung eintritt.
$m_T$ mittlere Dauer bis zur ersten Systemstörung.

## 3. Berechnung der Kenngrößen

### 3.1. Beschreibung durch einen homogenen Markov-Prozeß

Bei der mathematischen Beschreibung des zeitabhängigen und zufallsbeeinflußten Systemverhaltens wird von folgender Modellvorstellung ausgegangen: Das System befindet sich zu jedem Zeitpunkt $t \geqq 0$ in einem von $N$ Zuständen. $M = \{1, 2, \ldots N\}$ sei diese Zustandsmenge. Zum Startzeitpunkt $t = 0$ liege mit Wahrscheinlichkeit $p_k(0)$ der Zustand $k \in M$ vor. Wenn das System in einem Zustand $i$ ist, so „wählt" es entsprechend der Wahrscheinlichkeit $p_{ij}$ den Zustand $j$ (mit $j \neq i$) als nächstfolgenden aus. Vor diesem Übergang verbleibt es noch eine zufällige, exponentialverteilte Dauer $T_{ij}$ im alten Zustand. Nach dem Übergang beginnt alles von vorn — entsprechend einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wird der nächste Zustand ausgewählt, in den nach zufälliger Dauer übergegangen wird usw.
Sei $F_{ij}(t) = P\{T_{ij} < t\} = 1 - \exp(-m_{ij} t)$ die Verteilungsfunktion der Verweildauer $T_{ij}$. Der Zusammenhang zwischen Übergangswahrscheinlichkeit und exponentialverteilter Verweildauer wird durch die Übergangsrate ausgedrückt. Es sei

$$\lambda_{ji} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} P\{Z(t + \Delta t) = j \mid Z(t) = i\} \text{ für } i \neq j \text{ und} \tag{1}$$

$$\lambda_{jj} = - \sum_{\substack{i \in M \\ i \neq j}} \lambda_{ij}. \tag{2}$$

Zwischen $p_{ij}$, $F_{ij}(t)$ und $\lambda_{ji}$ bestehen folgende Zusammenhänge:

$$F_{ij}(t) = 1 - \exp(\lambda_{ii} t) \text{ für } i \neq j \tag{3}$$

$$p_{ij} = \frac{\lambda_{ji}}{\lambda_{ii}}. \tag{4}$$

Als mittlere Verweildauer $\mu_i$ im Zustand $i$ ergibt sich

$$\mu_i = \sum_{j \in M} p_{ij} \int_0^\infty t \, \mathrm{d} F_{ij}(t) = - \frac{1}{\lambda_{ii}}, \tag{5}$$

Durch die Angabe der drei Bestimmungsstücke

— Zustandsmenge $M = \{1, 2, \ldots N\}$
— Matrix $\Lambda = (\lambda_{ji})_{j,i \in M}$ der Übergangsraten
— Vektor $p(0) = (p_k(0))_{k \in M}$ der Anfangsverteilung

ist eindeutig ein zufälliger Prozeß $\{Z(t), t \geqq 0\}$ beschrieben, der als homogener Markov-Prozeß (mit stetiger Zeit und endlichem Zustandsraum) bezeichnet wird. Eine Veranschaulichung erfolgt in Form eines Übergangsgraphen, dessen Knoten die Zustände darstellen. Ist ein Übergang von $i$ nach $j$ möglich, werden beide Knoten durch einen gerichteten Bogen verbunden und die Übergangsrate dazugeschrieben (vgl. Bilder 1 und 2).
Vernachlässigt man die unterschiedlichen Verweildauern in den Zuständen und betrachtet das System nur zu den Zeitpunkten, in denen eine Zustandsänderung erfolgt, so ergibt sich wiederum ein zufälliger Prozeß, diesmal allerdings mit diskreter Zeit. Er wird als (in den homogenen Markov-Prozeß) eingebettete Markovsche Kette $\{Z(\tau), \tau = 0, 1, 2, \ldots\}$ bezeichnet und ist durch $M, p(0)$, und $P = (p_{ij})_{i,j \in M}$ eindeutig bestimmt. Ist wie bei den zur Beschreibung des Übertragungssystems konstruierten zufälligen Prozessen jeder Zustand von jedem anderen ausgehend nach endlich vielen Übergängen zu erreichen, so spricht man von einer nicht zerlegbaren Markovschen Kette.

### 3.2. Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit $P_j = \lim_{t \to \infty} P\{Z(t) = j\}$ dafür, daß sich das System zu einem beliebigen, aber „weit" vom Startzeitpunkt entfernten, Zeitpunkt $t$ im Zustand $j$ befindet.
Ist die eingebettete Markovsche Kette nichtzerlegbar, so existieren eindeutig die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten $\pi_j = \lim_{\tau \to \infty} P\{Z(\tau) = j\}$ der eingebetteten Markovschen Kette und ergeben sich als Lösung des Gleichungssystems

$$\pi_j = \sum_{k=1}^{N} \pi_k p_{kj}, \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{N} \pi_j = 1.$$

Durch Wichtung mit den mittleren Verweildauern lassen sich daraus die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten $P_j$, $j \in M$ des homogenen Markov-Prozesses berechnen:

$$P_j = \frac{\pi_j \mu_j}{\sum_{k=i}^{N} \pi_k \mu_k}. \tag{7}$$

### 3.3. Stationäre Aufenthaltswahrscheinlichkeiten

Zur Berechnung weiterer Kenngrößen interessiert nicht die Verweildauer in einem bestimmten Zustand, sondern in einer Teilmenge der Zustandsmenge, speziell in den Teilmengen $A = \{1, \ldots N_1\}$ der funktionsfähigen Systemzustände und der Teilmenge $B = M \setminus A = \{N_1 + 1, \ldots N\}$ der Zustände, die einer Systemstörung entsprechen. Auf einfache Weise ergibt sich die Kenngröße Verfügbarkeit, d.h. der mittlere Anteil der störungsfreien Arbeitszeit des Systems bezogen auf die Gesamtarbeitszeit:

$$V = \sum_{j \in A} P_j. \tag{8}$$

Zur Ermittlung weiterer Kenngrößen werden Ergebnisse von *Störmer* [1] verwendet. Um die mittlere Verweildauer in einer Zustandsteilmenge $C$ zu berechnen, untersucht man die zufällige Zeit vom Übergang in die Menge $C$ (hervorgerufen durch den Übergang von irgendeinem Zustand $k \notin C$ in irgendeinen Zustand $i \in C$) bis zum erstmaligen Übergang aus $C$ in die Menge $M \setminus C$. Speziell ergibt sich als mittlere Dauer einer Systemstörung

$$m_B = \frac{\sum_{i \in B} \pi_i \mu_i}{\sum_{\substack{i \in B \\ j \in A}} \pi_i p_{ji}}. \tag{9}$$

und als mittlere Dauer einer Arbeitsperiode

$$m_A = \frac{\sum_{i \in A} \pi_i \mu_i}{\sum_{\substack{i \in A \\ j \in B}} \pi_i p_{ji}}. \tag{10}$$

Als mittlere Anzahl von Systemstörungen in $t$ Zeiteinheiten erhält man daraus

$$EN(t) = t \frac{1}{m_A + m_B} \tag{11}$$

### 3.4. Instationäre Aufenthaltswahrscheinlichkeiten

Bei weiteren Kenngrößen soll zusätzlich der Einfluß des zum Startzeitpunkt vorliegenden Zustandes berücksichtigt werden, d.h., der Prozeß wird zu einem solchen Zeitpunkt $t$ beobachtet, in dem die Zustands- und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten möglicherweise noch vom Startzustand abhängen. Dabei werden wiederum Ergebnisse von *Störmer* [1] sowie von *Reinschke* [2] auf das konkrete Problem übertragen.
Untersucht wird die zufällige Zeit $T$, nach der erstmals ein Übergang aus der Teilmenge $A$ in die Teilmenge $B$ erfolgt, unter der Bedingung, daß zum Zeitpunkt $t = 0$ der Zustand $Z(0) = 1$ aus $A$ vorlag. Zunächst sind entsprechend der Menge $A$ verschiedene Hilfsgrößen zu bilden:

$\Lambda_{red} = (\lambda_{ji})_{j,i \in A}$ Matrix vom Typ $(N_1, N_1)$, enthält alle zu $A$ gehörenden Zeilen und Spalten von $\Lambda$.
$S = (s_i)_{i \in A}$ $N_1$-dimensionaler Zeilenvektor, dessen Komponenten sich aus der spaltenweisen Addition aller der Nichtdiagonalelemente von $\Lambda$ ergeben, die zu einer mit $A$ korrespondierenden Spalte

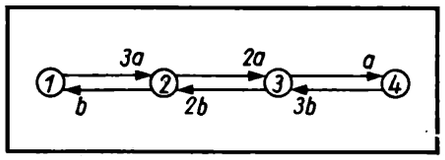



**Bild 1.** Übergangsgraph zum Näherungsmodell für eine Störungsart und gleichwertige Kanäle

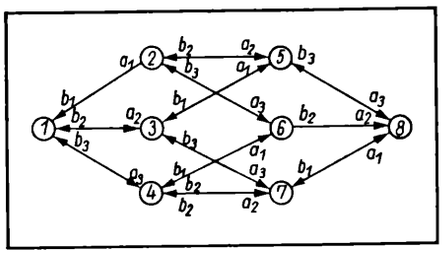


**Bild 2.** Übergangsgraph zum Näherungsmodell für eine Störungsart und ungleichwertige Kanäle

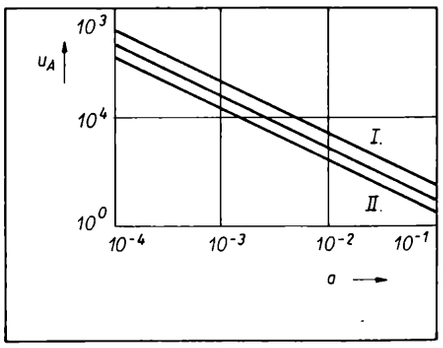



**Bild 3.** Mittlere Arbeitsdauer $\mu_A$ in Abhängigkeit von der Störungsrate $a$
I. $a_1 = a_2 = a_3 = a$
II. $a_1 = a_2 = a_3 = 3a$
III. $a_1 = a$, $a_2 = 2a$, $a_3 = 3a$

und einer mit $B$ korrespondierenden Zeile gehören: $s_i = \sum_{j \in B} \lambda_{ji}$, $i \in A$

$p_{red}(0) = (p_{red,j}(0))_{j \in A}$ Vektor mit den zu $A$ gehörenden Komponenten von $p(0)$

$p_{red}(t) = (p_{red,j}(t))_{j \in A}$ Vektor mit $N_1$ Komponenten, die den Zuständen aus $A$ zugeordnet sind, wobei

$p_{red,j}(t) = P\{Z(t) = j$ unter der Bedingung, daß $Z(0) = 1$ und Menge $A$ im Zeitraum $[0, t]$ nicht verlassen$\}$.

Nach [2] genügen die zeitabhängigen bedingten Zustandswahrscheinlichkeiten $p_{red,j}(t)$, $j \in A$ dem folgenden linearen System von $N_1$ homogenen Differentialgleichungen 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten und der Anfangsbedingung $p_{red}(0)$:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} p_{red,j}(t) = \sum_{i \in A} \lambda_{ji} p_{red,i}(t), \; j \in A. \tag{12}$$

Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß im Zeitraum $[0, t]$ keine Systemstörung auftritt (die Menge $A$ nicht verlassen wird), ergibt sich einfach durch Summation:

$$R(t) = \sum_{j \in A} p_{red,j}(t). \tag{13}$$

Für die mittlere Zeit bis zur ersten Systemstörung (den Erwartungswert von $T$) gilt nach [2] folgende Matrixgleichung:

$$m_T = S A_{red}^{-2} p_{red}(0). \tag{14}$$

## 4. Modelle für das Übertragungssystem

### 4.1. Vorbemerkungen

Die numerische Berechnung der Zuverlässigkeitskenngrößen erfordert die Auflösung von Gleichungs- und Differentialgleichungssystemen. Das betrifft insbesondere:

- — Auflösung des linearen Gleichungssystems (6) mit $N$ Gleichungen
- — Lösung des linearen Differentialgleichungssystems (12) mit $N_1$ Gleichungen
- — Invertierung der Matrix $A_{red}^2$ vom Typ $(N_1, N_1)$ zur Berechnung der Matrixgleichung (14).

Bei der Konstruktion eines Modells unter Berücksichtigung von drei verschiedenen Störungsarten und von unterschiedlichen Störungs- und Reparaturraten in den einzelnen Kanälen ergeben sich die Werte $N = 64$ und $N_1 = 10$, so daß die numerische Auflösung eine größere Rechenanlage erfordert. Zur Verringerung des rechentechnischen Aufwandes werden eine Reihe von einfacheren Näherungsmodellen konstruiert, die Abschätzungen der Zuverlässigkeitskenngrößen ermöglichen. Die Vereinfachungen erfolgen in zwei Richtungen:

**Tafel 1. Dimensionen der einzelnen Näherungsmodelle**

| | Eine Störungsart | Zwei Störungsarten | Alle drei Störungsarten |
|---|---|---|---|
| Gleichwertige Kanäle | $N = 4$<br>$N_1 = 2$ | $N = 10$<br>$N_1 = 3$ | $N = 20$<br>$N_1 = 6$ |
| Ungleichwertige Kanäle | $N = 8$<br>$N_1 = 4$ | $N = 27$<br>$N_1 = 7$ | $N = 64$<br>$N_1 = 10$ |

- — getrennte Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Störungsarten, indem nur eine (nur $FA$ bzw. $KU$ bzw. $LU$) oder nur zwei (z.B. nur $KU$ und $LU$) Störungsarten betrachtet werden
- — Ersetzung der Raten der einzelnen Kanäle durch die Werte des zuverlässigsten bzw. des unzuverlässigsten Kanals.

Die sich ergebenden Dimensionen der einzelnen Näherungsmodelle sind in der Tafel 1 zusammengefaßt.

Bei der Auswahl eines Näherungsmodells sind der notwendige rechentechnische Aufwand, die erreichbare Genauigkeit der Zuverlässigkeitsschranken (z.B. bei ungenauen Eingangsdaten) und das Ziel der Untersuchung (z.B. bei Variantenrechnungen über den Einfluß einer Eingangsgröße) zu berücksichtigen.

Aus Platzgründen werden im weiteren nur drei Modelle genauer beschrieben.

### 4.2. Näherungsmodell für eine Störungsart und gleichwertige Kanäle

*Annahmen:*

- — eine einzige Störungsart (im weiteren mit $FA$ bezeichnet, kann aber auch $KU$ oder $LU$ sein)
- — gleiche Störungsrate $a$ und gleiche Reparaturrate $b$ auf allen drei Kanälen

*Zustände:*

1 alle Kanäle funktionsfähig, keine $FA$
2 ein Kanal gestört durch $FA$
3 $FA$ bei zwei Kanälen
4 $FA$ bei drei Kanälen.

Damit ergibt sich $A = \{1, 2\}$ und $B = \{3, 4\}$

Übergangsgraph: Siehe Bild 1.

*Matrix der Übergangsraten:*

$$\begin{bmatrix} -3a & b & 0 & 0 \\ 3a & -2a-b & 2b & 0 \\ 0 & 2a & -a-2b & 3b \\ 0 & 0 & a & -3b \end{bmatrix}$$

*Bemerkungen:*

- — Die Bestimmungsgleichungen (6) bis (14) können direkt aufgelöst werden (vgl. Abschn. 5).
- — Eine Abschätzung der Zuverlässigkeitskenngrößen nach der „unsicheren Seite", d.h. nach der maximal erreichbaren Zuverlässigkeit, der Mindestanzahl von Störungen usw., kann gewonnen werden, wenn man nur eine Störungsart betrachtet und die Werte des zuverlässigsten Kanals ansetzt.

### 4.3. Näherungsmodell für eine Störungsart und ungleichwertige Kanäle

*Annahmen:*

- — eine einzige Störungsart (mit $FA$ bezeichnet)
- — im Kanal $i$ Störungsrate $a_i$ und Reparaturrate $b_i$ $(i = 1, 2, 3)$

*Zustände:*

1 keine $FA$
2 $FA$ von Kanal 1
3 $FA$ von Kanal 2
4 $FA$ von Kanal 3
5 $FA$ der Kanäle 1 und 2
6 $FA$ der Kanäle 1 und 3
7 $FA$ der Kanäle 2 und 3
8 $FA$ aller drei Kanäle

$A = \{1, 2, 3, 4\}$ und $B = \{5, 6, 7, 8\}$

Übergangsgraph: Siehe Bild 2.

*Matrix der Übergangsraten (ohne $\lambda_{jj}$):*

$$\begin{bmatrix} . & b_1 & b_2 & b_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & . & 0 & 0 & b_2 & b_3 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & . & 0 & b_1 & 0 & b_3 & 0 \\ a_3 & 0 & 0 & . & 0 & b_1 & b_2 & 0 \\ 0 & a_2 & a_1 & 0 & . & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & a_3 & 0 & a_1 & 0 & . & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & a_3 & a_2 & 0 & 0 & . & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_3 & a_2 & a_1 & . \end{bmatrix}$$

### 4.4. Näherungsmodell für drei Störungsarten und gleichwertige Kanäle

*Annahmen:*

— drei Störungsarten *KU*, *LU* und *FA*
— gleiche Störungs- und Reparaturraten auf allen drei Kanälen

*Zustände:*

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | keine Störung | 11 | 3 *KU* |
| 2 | *KU* eines Kanals | 12 | 2 *KU*, *LU* |
| 3 | *LU* eines Kanals | 13 | 2 *KU*, *FA* |
| 4 | *FA* eines Kanals | 14 | 3 *LU* |
| 5 | *KU* zweier Kanäle | 15 | 2 *LU*, *KU* |
| 6 | *KU* eines Kanals, | 16 | 2 *LU*, *FA* |
| | *LU* eines zweiten | 17 | 3 *FA* |
| 7 | *KU*, *FA* | 18 | 2 *FA*, *KU* |
| 8 | 2 *LU* | 19 | 2 *FA*, *LU* |
| 9 | *LU*, *FA* | 20 | *KU*, *LU*, *FA* |
| 10 | 2 *FA* | | |

Bei der Untersuchung der Systemstörungen ist zu unterscheiden, ob es dabei durch *FA* von mindestens zwei Kanälen zu einer *FA* des Systems kommt oder ob durch die Unterbrechung von mindestens zwei Kanälen eine eventuell notwendige Signalübertragung unmöglich wird.

$A = \{1, 2, 3, 4, 7, 9\}$
$B_U$ Menge der Zustände, in denen keine Übertragung möglich ist
$B_U = \{5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20\}$
$B_{FA}$ Menge der Zustände, in denen eine Fehlauslösung erfolgt
$B_{FA} = \{10, 17, 18, 19\}$

## 5. Auflösung der Bestimmungsgleichungen

Im allgemeinen sind die Bestimmungsgleichungen nicht bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand direkt auflösbar, so daß die Verwendung eines Kleinrechners bzw. beim genauen Modell eines größeren Rechners erforderlich ist. Für das einfachste Näherungsmodell mit einer Störungsart und gleichwertigen Kanälen dagegen ist eine direkte Berechnung der Kenngrößen möglich.

*a) Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten der eingebetteten Markovschen Kette*

In dem linear abhängigen Gleichungssystem

$$\Pi_j = \sum_{k=1}^{4} \Pi_k \frac{\lambda_{jk}}{-\lambda_{kk}} \quad j = 1 \cdots 4 \tag{15}$$

wird die letzte Zeile durch $\sum_{j=1}^{4} \pi_j = 1$ ersetzt.

Als Lösung des Gleichungssystems erhält man

$$\pi_1 = b^2 \pi_0 \qquad \pi_3 = a(a+2b)\pi_0 \tag{16}$$

$$\pi_2 = b(2a+b)\pi_0 \qquad \pi_4 = a^2 \pi_0 \qquad \text{mit } \pi_0 = \frac{1}{2(a+b)^2}$$

*b) Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten des Markov-Prozesses*

Durch Einsetzen der $\Pi_i$ in (7) ergibt sich

$$P_1 = b^3 P_0 \qquad P_3 = 3a^2 b P_0 \tag{17}$$

$$P_2 = 3ab^2 P_0 \qquad P_4 = a^3 P_0 \text{ mit } P_0 = \frac{1}{(a+b)^3} \tag{18}$$

*c) Verfügbarkeit*

$$V = P_1 + P_2 = \frac{(3a+b)\,b^2}{(a+b)^3} \tag{19}$$

*d) Mittlere Störungsdauer*

$$m_B = \frac{\pi_3 \mu_3 + \pi_4 \mu_4}{\pi_3 \lambda_{23} \mu_3} = \frac{a+3b}{6b^2} \tag{20}$$

*e) Mittlere Arbeitsdauer*

$$m_A = \frac{\pi_1 \mu_1 + \pi_2 \mu_2}{\pi_2 \lambda_{32} \mu_4} = \frac{3a+b}{6a^2} \tag{21}$$

*f) Mittlere Anzahl von Störungen*

$$EN(t) = t \frac{6a^2 b^2}{(a+b)^3} \tag{22}$$

*g) Lösung des Differentialgleichungssystems mittels Ansatzmethode*

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} p_{red,1}(t) = -3a \; p_{red,1}(t) + b\, p_{red,2}(t)$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} p_{red,2}(t) = 3a\, p_{red,1}(t) - (2a\,b)\, p_{red,2}(t) \tag{23}$$

Zunächst werden aus der charakteristischen Gleichung die Eigenwerte $\alpha_1, \alpha_2$ berechnet:

$$\alpha_{1/2} = -\frac{5a+b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a+b}{2}\right)^2 + 2ab} \tag{24}$$

Lösungsansatz: $p_{red,j}(t) = A_j \exp(\alpha_1 t) + B_j \exp(\alpha_2 t)$ $j = 1,2$
Aus der Anfangsbedingung folgt $B_1 + B_2 = 1 - (A_1 + A_2)$
Durch Einsetzen des Ansatzes in (23) und Koeffizientenvergleich erhält man

$$A_1 + A_2 = \frac{\alpha_2 + 3a}{\alpha_2 - \alpha_1} \; \frac{\alpha_1 + 3a + b}{b} \tag{25}$$

Aus den Hilfsgrößen $\alpha_1, \alpha_2$ und $A_1 + A_2$ ergibt sich die Zuverlässigkeit $R(t) = (A_1 + A_2) \exp(\alpha_1 t) + (1 - A_1 - A_2) \exp(\alpha_2 t)$ (26)

*h) Mittlere Zeit bis zur ersten Systemstörung*

Zunächst wird $\Lambda_{red}{}^{-2} = (\Lambda_{red}{}^2)^{-1}$ durch Matrixmultiplikation von $\Lambda_{red}$ mit sich selbst und folgende Invertierung berechnet.

$$\Lambda_{red}{}^{-2} = \frac{1}{36a^4} \cdot \begin{bmatrix} 4a^2 + 7ab + b^2 & 5ab + b^2 \\ 15a^2 + 3ab & 9a^2 + 3ab \end{bmatrix} \tag{27}$$

Weiter gilt: $S = (0, 2a)$ und $p_{red}(0) = (1, 0)^T$.
Aus der Matrixgleichung (14) ergibt sich damit

$$m_T = \frac{5a+b}{6a^2} \tag{28}$$

## 6. Beispiele

### 6.1. Modell für eine Störungsart

Siehe Bilder 3 und 4.

### 6.2. Modell für drei Störungsarten und gleichwertige Kanäle

Siehe Bilder 5 bis 9.

## 7. Zusammenfassung

Betrachtet wird ein Schutzsignal-Übertragungssystem mit drei Übertragungskanälen, in denen zufallsbedingt folgende Störungen auftreten können: Fehlauslösungen, d.h. irrtümliche Übertragungen von Signalen, und Unterbrechungen der Kanäle, die eine eventuell notwendige Übertragung eines Signals verhindern würden. Das System stellt zuverlässigkeitslogisch eine 2-aus-3-Schaltung dar, d.h., eine Störung des Systems tritt ein, wenn mehr als ein Kanal gestört ist. Ausgehend von Kenntnissen über das Störungsverhalten der einzelnen Kanäle (Verteilungsparameter der Störungsabstände und -dauern) werden Verfahren zur Berechnung von Zuverlässigkeitskenngrößen des Systems entwickelt, die verschiedene Aspekte des Störungsgeschehens beschreiben. Im einzelnen sind dies:

— die mittlere Anzahl von Störungen in einer bestimmten Zeiteinheit, z.B. je Jahr
— die mittlere Dauer $m_B$ einer Störung
— die mittlere Dauer $m_A$ von der Beendigung einer Störung bis zum Beginn der nächsten
— die Verfügbarkeit $V$
— die Zuverlässigkeit $R(t)$
— die mittlere Zeit $m_T$ bis zur ersten Störung eines neu in Betrieb genommenen Systems.

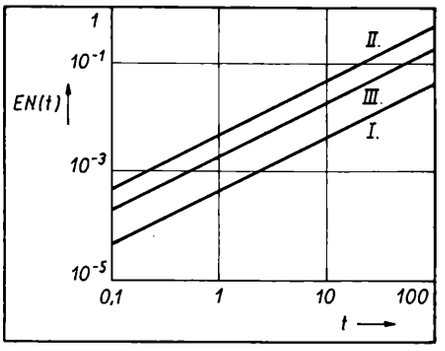



**Bild 4.** Mittlere Anzahl von Ausfällen in Abhängigkeit vom Beobachtungszeitraum $t$
$a = 10^{-2}$

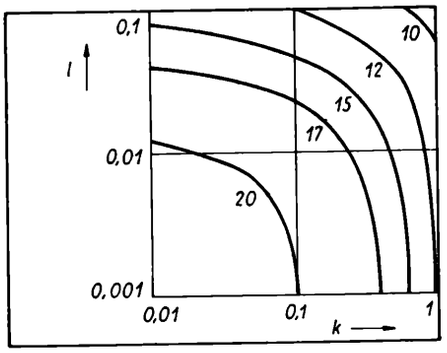



**Bild 5.** Mittlere Arbeitsdauer $\mu_A$ beim Ausgangsbeispiel mit den Werten $a = 10, b = 100, m = 10, n = 1$

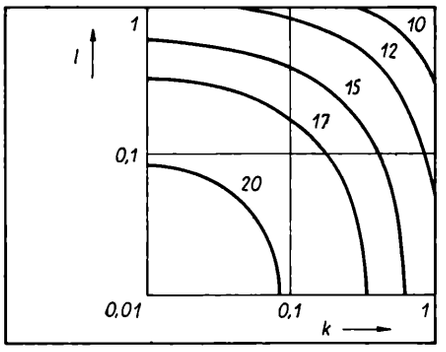



**Bild 6.** $\mu_A$ bei kürzerer Dauer der $LU$; $n = 10$

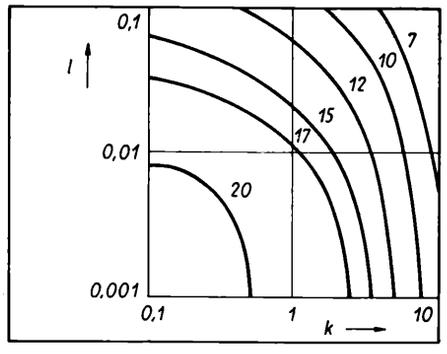



**Bild 7.** $\mu_A$ bei kürzerer Dauer der $KU$; $m = 100$

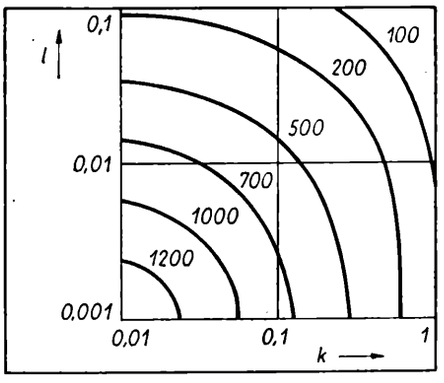



**Bild 8.** $\mu_A$ bei geringerer Häufigkeit der $FA$; $a = 1$

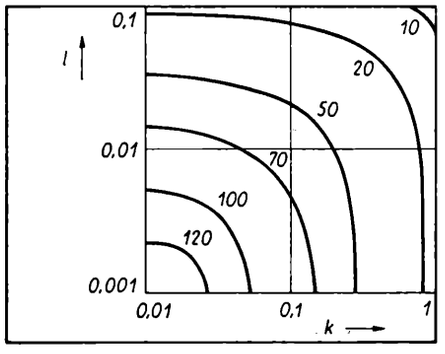



**Bild 9.** $\mu_A$ bei kürzerer Dauer der $FA$; $b = 1000$

Zur Beschreibung des von den zufälligen Störungen beeinflußten Systemverhaltens wird davon ausgegangen, daß

— drei Störungsarten auftreten
— die Dauern der Störungen und ihre Abstände exponentialverteilte Zufallsgrößen sind, deren Verteilungsparameter von der Störungsart und vom Kanal abhängen.

Das Systemverhalten kann dann durch einen homogenen Markov-Prozeß mit stetiger Zeit beschrieben werden. Die Berechnung der Kenngrößen erfolgt mit bekannten Methoden der Theorie zufälliger Prozesse, insbesondere mit von *Störmer* und *Reinschke* entwickelten Methoden der Untersuchung des Aufenthalts in Zustandsteilmengen. Die Formeln gelten für beliebige homogene Markov-Prozesse, der rechnerische Aufwand bei ihrer Auflösung hängt aber von der Anzahl der Systemzustände ab. Im allgemeinen ist die Benutzung eines Rechners erforderlich. Neben dem genauen Modell werden deshalb eine Reihe von einfacheren Näherungsmodellen konstruiert, die leichter lösbar sind und die Abschätzung des Einflusses der einzelnen Störungsarten und der unterschiedlichen Zuverlässigkeit der Kanäle ermöglichen. Für das einfachste Näherungsmodell mit nur einer Störungsart und gleichen Kanälen können die Bestimmungsgleichungen der Kenngrößen direkt aufgelöst werden. Eine Übertragung der Vorgehensweise auf anders strukturierte Systeme (z. B. 2-aus-2-Schaltung) bereitet keine Schwierigkeiten.

Mit der möglichen Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngrößen von Systemen der Netzschutzsignalübertragung können durch Variantenrechnungen die erforderlichen Zuverlässigkeitsparameter der vorhandenen bzw. künftig benötigten Übertragungskanäle und ihre notwendige Anzahl ermittelt werden. Dies ist sowohl für die Planung als auch für die Betriebsführung von wesentlicher Bedeutung, da durch eine mögliche Reduzierung der benötigten Kanäle Investitionsmittel eingespart werden können und erhebliche Vorteile bei der Überwachung und Bestimmung der Qualitätsparameter der Übertragungskanäle entstehen. Die Nutzung der Ergebnisse zur Berechnung relevanter Zuverlässigkeitskenngrößen für die Übertragung von Netzschutzsignalen erfolgt für das 380/220-kV-Hochspannungsnetz im Bereich des VE Kombinates Verbundnetze Energie.

## Literatur

[1] *Störmer, H.*: Semi-Markoff-Prozesse mit endlich vielen Zuständen. Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag 1970
[2] *Reinschke, K.*: Zuverlässigkeit von Systemen. Band 1. Berlin: VEB Verlag Technik 1973

EA 5438

---

Wir erinnern an die **7. Zuverlässigkeitstagung,**

die vom 11. bis 12. April 1985 von der Wissenschaftlichen Sektion Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit des Fachverbandes Elektrotechnik in der Kammer der Technik durchgeführt worden ist (angekündigt in ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 10, S. 362; ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 202).

Thema der Tagung

Wissenschaftliche Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Erhöhung und Gewährleistung der Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse und Prozesse unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung der Mikroelektronik

Plenarvorträge

*Uschakow, I. A.; Reinschke, K.*: Zuverlässigkeitsstrukturen — Wege zu ihrer Ermittlung und Auswertung

*Müller, K. H.*: Systemzustände und Kenngrößen komplizierter Systeme

*Fischer, K.*: Systemleistungsfähigkeit — Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit der Systemelemente

*Beleites, E.*: Erhöhung der Effektivität der Zuverlässigkeit auf der Basis rechtlicher Regelungen

Die Redaktion

# Einfluß magnetischer Felder auf Stahlkonstruktionen

**E. Höhne, KDT; K. Kramer, KDT; Dresden**

## 1. Problemstellung

Werden Hochstromanlagen in Bauwerken montiert, deren Gerüstkonstruktion aus Stahlprofilen besteht, ist der Einfluß der magnetischen Felder, der sich in Erwärmung der Stahlkonstruktion durch Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste sowie durch Induktionsströme zeigt, zu beachten.

Am Beispiel der Maschinenschaltanlage des Pumpspeicherwerkes (PSW) Markersbach (Bild 1), die wegen der durch die Gebirgslage bedingten kurzen Bauzeit als Stahlskelettbau errichtet wurde, wird deutlich, daß bei der Konstruktion der Hochstromschaltanlage Kreuzungen zwischen Stromschienen und Stahlprofilen mit relativ geringen Abständen sowie parallel zu den Stromschienen liegende Leiterschleifen aus Stahlprofilen nicht zu vermeiden sind [2].

Daraus ergeben sich bei der Projektierung folgende Fragen:

— Treten in den Stahlträgern unzulässige Erwärmungen auf?
— Welche Maßnahmen bzw. Konstruktionsregeln sind zur Reduzierung der Erwärmung einzuhalten?

## 2. Erwärmung durch Ummagnetisierung

Die Maschinenschaltanlage des PSW Markersbach [2] hat einen Nennstrom von 8,1 kA. Es war deshalb zu untersuchen, in welchem Bereich Temperaturerhöhungen in der Stahlkonstruktion durch Wirbelstrom- und Hystereseverluste auftreten.

Dr.-Ing. *Eberhard Höhne* ist Abteilungsleiter im VEB Kombinat Kraftwerksanlagenbau Berlin, Projektierungsbereich Radebeul. Dipl.-Ing. *Kurt Kramer*, ist Mitarbeiter im VEB „Otto Buchwitz" Starkstromanlagenbau Dresden.

Da Berechnungsverfahren nur für Magnetfelder einfacher Geometrie vorhanden sind, wurden entsprechende experimentelleVersuche durchgeführt [4].

### 2.1. Versuchs- und Meßanordnung

Wie aus Bild 1 ersichtlich, umschließt aus statischen Gründen die Stahlkonstruktion an verschiedenen Stellen die Stromschienen (Drehstromsystem) in Form eines geschlossenen Rahmens. Als Modell wurde deshalb ein Stahlrahmen mit den Längsabmessungen im Maßstab 1:1 gebaut, der als ungünstigster Fall zu betrachten ist und durch den die Stromschienen in der in Bild 2 gezeigten Art angeordnet wurden.

Zu ermitteln waren die in den Stahlrahmen auftretenden Temperaturen in Abhängigkeit von der Stromstärke in den Leitern und vom Abstand der Leiter vom Stahlrahmen sowie die Flußverteilung im Stahlrahmen in Abhängigkeit vom Abstand der Leiter vom Stahlrahmen. Die Temperaturmessung erfolgte mit Cu-Kon-Thermoelementen, die in Bohrungen im Stahlrahmen angeordnet waren. Um die höchsten Temperaturen zu messen, wurden die Meßstellen unmittelbar oberhalb und unterhalb der Leiter angebracht. Zur Ermittlung der Flußverteilung im Stahlrahmen wurde mit Hilfe einer Meßschleife aus 0,5 mm starkem Cu-Draht die induzierte Spannung an verschiedenen, definierten Stellen gemessen.

Die Schleifen wurden so um den Rahmen gelegt, daß der zu bestimmende Fluß die Schleife senkrecht durchsetzt.

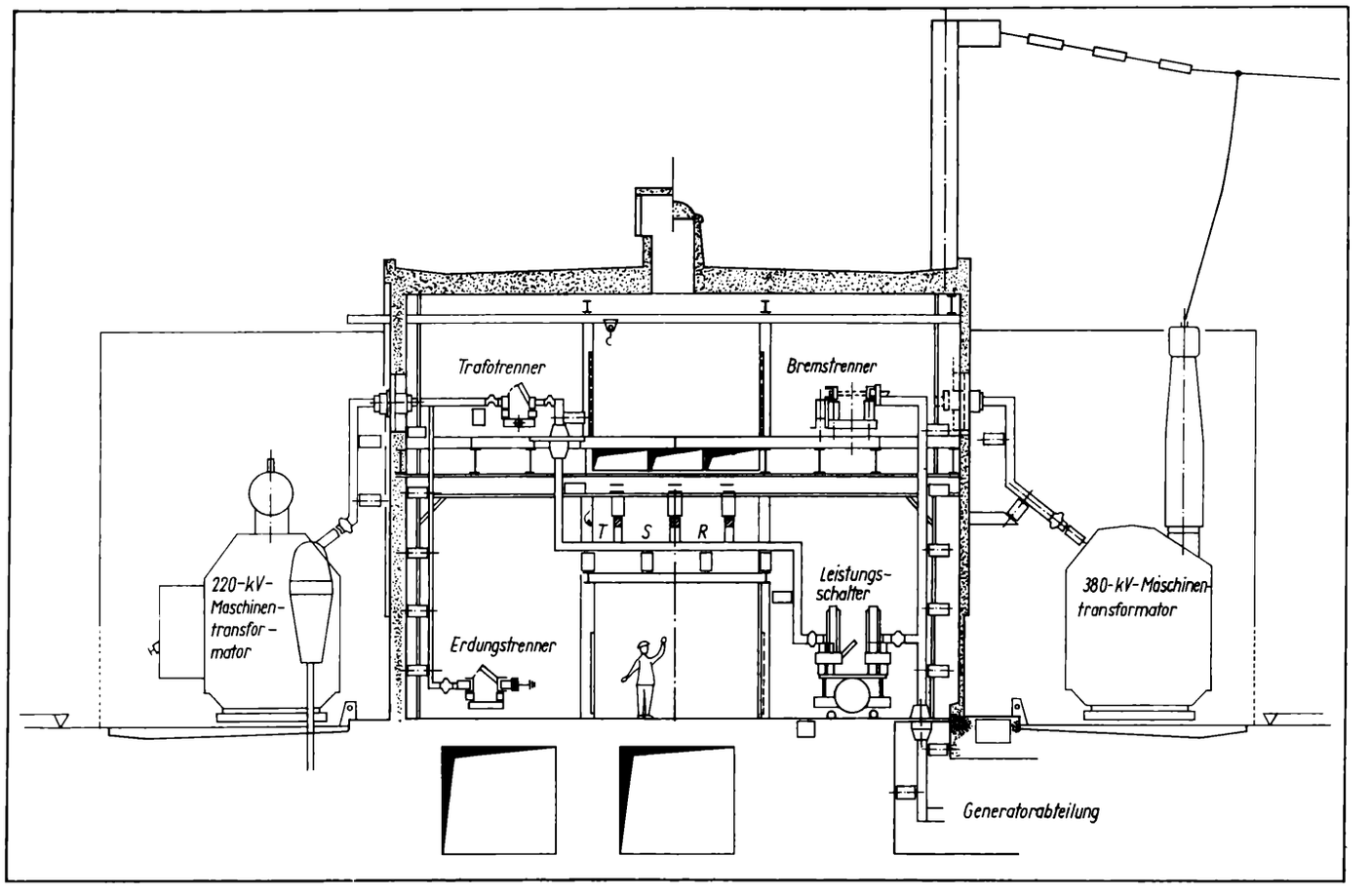
Für die weitere Auswertung wurden die gemessenen Spannungen unmittelbar verwendet, da sie dem Fluß direkt proportional sind.

### 2.2. Versuchsdurchführung

Die Messung wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

— Variation der Stromstärken zwischen 2 und 6,8 kA
— Änderung des Abstandes — oberer Querträger zum Stromschienensystem — Abstände $a$ = 140 mm, 300 mm und 500 mm
— Anbringen von Kurzschlußringen an den Stellen der höchsten Flußdichte in vier Varianten entsprechend Bild 3, Messung mit der höchsten Stromstärke $I$ = 6,8 kA und mit den Abständen 140 mm und 500 mm.

**Bild 1.** Schnitt Maschinenschaltanlage



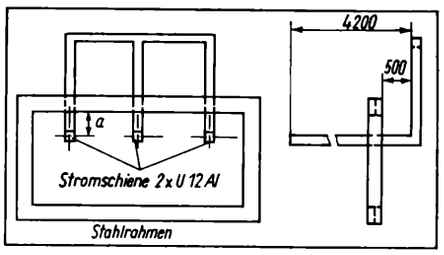



**Bild 2.** Anordnung der Stromschienen im Versuchsmodell Erwärmungsprüfung der Stahlkonstruktion

Der im PSW Markersbach vorhandene Nennstrom von $I = 8{,}1$ kA konnte auf Grund der Impedanz der Versuchsanordnung nicht erreicht werden. Die unsymmetrische Anordnung der Leiter machte es außerdem unmöglich, gleiche Leiterströme zu erzielen.

### 2.3. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

— Flußdichte- und Verteilung längs des Stahlprofilrahmens in Abhängigkeit von Leiterabstand und Stromstärke
— Zusammenhang zwischen Fluß und Temperatur
— Einfluß der Kurzschlußringe auf Fluß und Temperatur.

#### *2.3.1. Flußverteilung*

Die längs des Stahlrahmens in der Meßschleife induzierten Spannungen sind im Bild 3 eingetragen. Aus der Verteilung der gemessenen Spannungen geht hervor, daß es offenbar keinen nennenswerten Fluß innerhalb des geschlossenen Rahmens gibt. Die ausgeprägten Maxima im oberen Querträger weisen daraufhin, daß sich die Magnetfelder der drei Leiter kaum beeinflussen und die Anordnung in erster Näherung wie drei Einleiteranordnungen betrachtet werden kann.
Die Auftrennung des Stahlrahmens zwecks Erhöhung des magnetischen Widerstandes bringt keine Verringerung der Erwärmung, da sich die Einzelfelder über den Luftraum schließen und bei Näherung der Stromschienen an den Stahlträger sich in diesem stark verdichten.

#### *2.3.2. Temperatur*

Die höchsten Temperaturen wurden im oberen Querträger an den Stellen der Flußmaxima gemessen. Die Flußverteilung gibt gleichzeitig die Temperaturverteilung an. Im Bild 4 sind die ermittelten maximalen Übertemperaturen dargestellt. Die für einen Strom von 8 kA zu erwartenden Temperaturen erhält man durch Extrapolieren der Kurven. Die Meßwerte beim Abstand $a = 140$ mm zeigen, daß eine Sättigung des Eisens noch nicht vorliegt und damit die Extrapolation bis 8,1 kA für Abstände $a \geqq 300$ mm gerechtfertigt ist. Aus den Messungen wurden außerdem die maximalen Übertemperaturen in Abhängigkeit von der induzierten Spannung ermittelt (Bild 5). Daraus ist ersichtlich, daß bei geringer Spannung, entspricht einem kleinen Fluß, die Übertemperaturen vernachlässigbar klein sind. Außerdem erkennt man, daß ausschließlich die Flußdichte im Eisen die Höhe der Übertemperatur bestimmt.

#### *2.3.3. Einfluß der Kurzschlußringe*

Da die gemessenen Übertemperaturen für den Korrosionsschutz schon wesentlich zu hoch waren, wurden zur Verringerung des Flusses an den Stellen der Flußmaxima Kurzschlußringe um die Stahlträger angeordnet. Diese umfassen den Fluß im Stahlträger. Damit wird im Kurzschlußring eine Spannung induziert, die einen Stromfluß und damit einen entgegengerichteten Fluß zur Folge hat. Es ergibt sich eine neue Flußverteilung im Stahlrahmen, die für die 4 Varianten der Anbringung der Kurzschlußringe im Bild 3 gezeigt wird.
Man erkennt, daß an den Stellen, an denen sich die Kurzschlußringe befinden, Flußminima sind und die Flußmaxima zwischen den Kurzschlußringen auftreten. Beachtet man die Abhängigkeit der Übertemperatur von der Höhe des Flusses (Bild 5), so kann man leicht abschätzen, daß die Verlustleistung im Stahlkörper wesentlich verringert wird.
Für die verschiedenen Varianten der Anordnung der Kurzschlußringe ergaben sich für den Abstand $a = 500$ mm mit $I = 6{,}8$ kA folgende maximale Übertemperaturen:

Variante $a$ = 25 K
Variante $b$ = 22 K
Variante $c$ = 17 K
Variante $d$ = 14 K.

Ohne Kurzschluß ergaben sich etwa 60 K.

#### *2.3.4. Schlußfolgerungen*

Die Versuche ergaben, daß bei den konstruktiv bedingten Abständen zwischen den stromführenden Leitern und den quer dazu angeordneten Stahlträgern Endtemperaturen von etwa 130 °C zu erwarten sind. Vom Bauprojektanten wurde eine maximale Endtemperatur von 60 °C zugelassen, da bei höheren Temperaturen der Korrosionsschutz schadhaft wird. Für die Realisierung wurden deshalb an allen Kreuzungsstellen zwischen Stromschienen und Stahlträgern Kurzschlußringe angebracht.

**Bild 3.** Induzierte Spannung längs des Stahlprofilrahmens als Maß für die Flußverteilung ▼

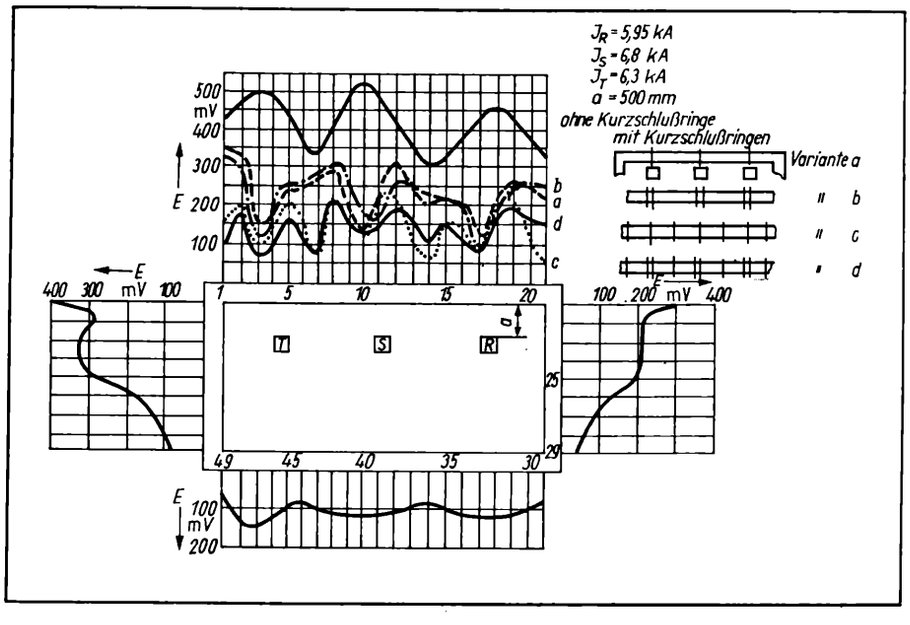
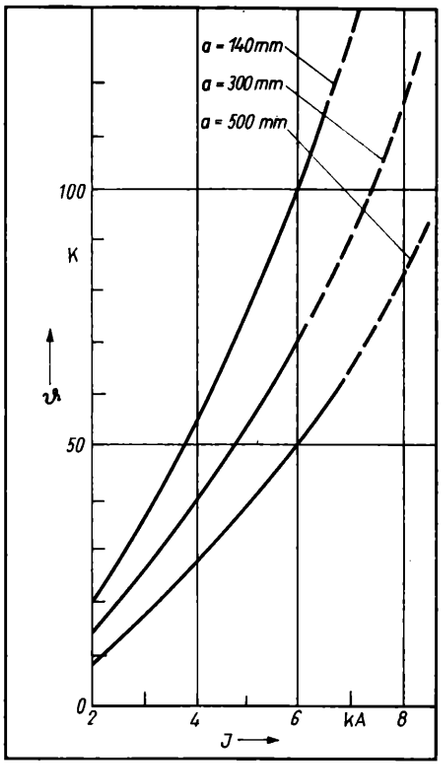



**Bild 4.** Übertemperatur im oberen Querträger abhängig von Stromstärke und Abstand ▶



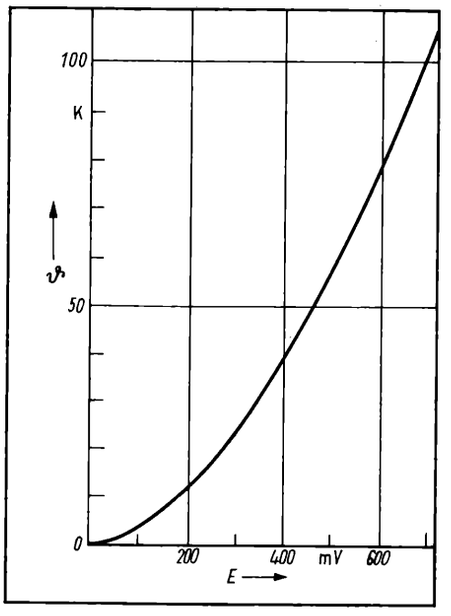



**Bild 5.** Maximale Übertemperatur abhängig von der induzierten Spannung (Fluß)

### 2.4. Überprüfung der Ergebnisse

Nach Inbetriebnahme der ersten Maschinen des PSW Markersbach wurden in der Maschinenschaltanlage Temperaturmessungen durchgeführt, um einen Vergleich der Versuchsergebnisse mit den tatsächlichen Verhältnissen zu erhalten und die Wirksamkeit der Kurzschlußringe zu bestätigen.

Die Temperaturen wurden mit einer berührungslosen Meßmethode, die die Infrarotstrahlung auswertet, gemessen.

Dabei wurde festgestellt, daß die tatsächlichen Übertemperaturen niedriger waren als nach dem Versuchsergebnis zu erwarten war. Zwei Beispiele zeigen dies:

— Kurzschlußringe nach Variante *a*, Leiterstrom $I = 7{,}2$ kA, erwartete Übertemperatur $\vartheta_{max} = 25$ K; gemessen an drei vergleichbaren Stellen (24, 17 bzw. 14) K,

— Kurzschlußringe nach Variante *d*, Leiterstrom $I = 7{,}8$ kA, erwartete Übertemperatur $\vartheta_{max} = 17$ K, gemessen 14 K.

Beim Vergleich der Meßwerte ist zu berücksichtigen, daß die Stahlprofilabmessungen in der Maschinenschaltanlage wesentlich größer sind als die des Versuchsmodells. Damit ergeben sich andere Verhältnisse in bezug auf die Wärmeabfuhr, so daß die Abweichung der in der Praxis gegenüber dem Versuchsmodell niedriger gemessenen Temperaturen erklärt ist. Die Anbringung der Kurzschlußringe an den Stahlträgern sollte je nach Abstand *a* ab bestimmten Strömen (3 kA bei $a \approx 150$ mm; 4 kA bei $a \approx 300$ mm bzw. 5 kA bei $\approx 500$ mm) grundsätzlich vorgenommen werden, wenn die Endtemperatur 60 °C bei 20 °C Umgebungstemperatur nicht überschritten werden soll.

## 3. Induktionsströme in der Stahlkonstruktion

In Stahlprofilen, die in der Nähe der Stromschienen eine Leiterschleife bilden und deren aufgespannte Fläche von einer senkrechten Flußkomponente durchsetzt wird, wird eine Spannung induziert, die einen Strom antreibt, der wiederum Temperaturerhöhungen in den Stahlteilen hervorruft. Die Berechnung der Spannung kann angenähert mit Gleichung (11) in [1] durchgeführt werden. Der errechnete Wert wird jedoch zu groß sein, da in dieser Gleichung der erregende Stromleiter unendlich lang ist. Eine genaue Berechnung der Spannung erfordert, die tatsächliche Länge des oder der erregenden Leiter zu berücksichtigen.

Die Ableitung des Flusses bzw. der induzierten Spannung über die Feldstärke erfolgt aus dem Gesetz von Biot-Savart [3].

$$\underline{\vec{H}} = \oint \frac{\underline{J}\,(\mathrm{d}\vec{s} \times \vec{r})}{4\pi r^3} \tag{1}$$

und aus:

$$\underline{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t_A} \int \underline{\vec{H}}\,\mu\,\mathrm{d}\vec{A}\,. \tag{2}$$

Im Bild 6 sind die räumlichen Zusammenhänge zwischen Stromleiter und paralleler Leiterschleife dargestellt. Zur Vereinfachung der Ableitung wird die Leiterschleife in eine Ebene des räumlichen Koordinatensystems gelegt. In der gewählten Anordnung durchsetzt die Feldstärkekomponente $H_y$ die Leiterschleife senkrecht. Die Feldstärke $H_y$ in einem beliebigen Punkt $P$ (x, y, z) der x-z-Ebene d. h. für $y = 0$, ergibt sich durch Ableitung aus (1) zu:

$$\underline{H}_Y = -\frac{1}{4\pi}\,\frac{x\,(z-s)}{(a^2+x^2)\,\sqrt{a^2+x^2+(z-s)^2}}\Bigg|_{s_1}^{s_2} \tag{3}$$

Zur Berechnung der in der Leiterschleife induzierten Spannung wird (3) in (2) eingesetzt, und es wird:

$$\underline{E} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\,\frac{\underline{J}\,\mu_0}{4\pi}\left[\int_{x_1}^{x_2}\int_{z_1}^{z_2} \frac{x}{x^2+a^2}\,\frac{z-s_2}{\sqrt{a^2+x^2+(z-s_2)^2}}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z - \int_{x_1}^{x_2}\int_{z_1}^{z_2} \frac{x}{x^2+a^2}\,\frac{z-s_1}{\sqrt{a^2+x^2+(z-s_1)^2}}\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}z\right]$$

$$\underline{E} = j\,\omega\,\frac{\underline{J}\,\mu_0}{4\pi}$$

$$\left[\left(\sqrt{a^2+x_2^2+(z_2-s_2)^2} + \frac{z_2-s_2}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_2-s_2)^2}-(z_2-s_2)}{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_2-s_2)^2}+(z_2-s_2)}\right)\right.$$

$$-\left(\sqrt{a^2+x_1^2+(z_2-s_2)^2} + \frac{z_2-s_2}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_2-s_2)^2}-(z_2-s_2)}{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_2-s_2)^2}+(z_2-s_2)}\right)$$

$$-\left(\sqrt{a^2+x^2+(z_1-s_2)^2} + \frac{z_1-s_2}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_1-s_2)^2}-(z_1-s_2)}{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_1-s_2)^2}+(z_1-s_2)}\right)$$

$$+\left(\sqrt{a^2+x_1^2+(z_1-s_2)^2} + \frac{z_1-s_2}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_1-s_2)^2}-(z_1-s_2)}{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_1-s_2)^2}+(z_1-s_2)}\right)$$

$$-\left(\sqrt{a^2+x_2^2+(z_2-s_1)^2} + \frac{z_2-s_1}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_2-s_1)^2}-(z_2-s_1)}{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_2-s_1)^2}+(z_2-s_1)}\right)$$

$$+\left(\sqrt{a^2+x_1^2+(z_2-s_1)^2} + \frac{z_2-s_1}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_2-s_1)^2}-(z_2-s_1)}{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_2-s_1)^2}+(z_2-s_1)}\right)$$

$$+\left(\sqrt{a^2+x_2^2+(z_1-s_1)^2} + \frac{z_1-s_1}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_1-s_1)^2}-(z_1-s_1)}{\sqrt{a^2+x_2^2+(z_1-s_1)^2}+(z_1-s_1)}\right)$$

$$\left.-\left(\sqrt{a^2+x_1^2+(z_1-s_1)^2} + \frac{z_1-s_1}{2}\ln\frac{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_1-s_1)^2}-(z_1-s_1)}{\sqrt{a^2+x_1^2+(z_1-s_1)^2}+(z_1-s_1)}\right)\right]. \tag{4}$$

Bei mehrphasigem erregendem System sind für jede Phase die entsprechenden Koordinaten einzusetzen, und die induzierte Spannung ist:

$$\underline{E} = \sum_{n=1}^{n} \underline{E}_n\,. \tag{5}$$

Mit Gleichung (4) wurden mehrere charakteristische Leiterschleifen überprüft. Die Zu- und Abführung der Stromschienen erfolgt meistens senkrecht zu den Schleifen, so daß der Flußanteil dieser Teile der Stromleiter vernachlässigt werden kann. Die Impedanzen der Schleifen wurden mit der Gleichung (14) in [1] berechnet. Dabei wurde als Ersatzradius für die Stahlprofile $R = 0{,}1$ m angenommen. Da die geometrischen Abmessungen der Stahlprofile klein gegenüber der Seitenlängen der Schleifen sind, ist die Annahme für eine angenäherte Berechnung ausreichend. Die Nachrechnung einiger

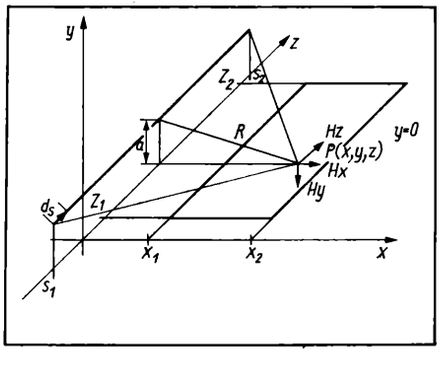



**Bild 6.** Geometrische Anordnung Leiterschleife – Stromleiter zur Ableitung der Spannung

Leiterschleifen der Maschinenschaltanlage (Bild 1) des PSW Markersbach ergab:

| | | $U$ in V | $X$ in mΩ | $I$ in A |
|---|---|---|---|---|
| LS-Abzweig | Schleife 1 | 1,04 | 11,5 | 88 |
| | Schleife 2 | 1,61 | 11,5 | 140 |
| Sammelschiene | | 3,63 | 13,4 | 270 |
| Drehrichtungsumkehr | | 3,5 | 17,5 | 200 |

Die genannten Werte konnten meßtechnisch nicht nachgeprüft werden. Es kann jedoch ausgesagt werden, daß die Größenordnung des errechneten Stromes richtig ist.
Eine genaue Berechnung würde die Ermittlung des Ersatzradius und vor allem die Kenntnis der relativen Permeabilität des Stahles voraussetzen.

### 4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, daß große magnetische Feldstärken Stahlteile der umgebenden Bauhülle beachtlich erwärmen können. Modellversuche zeigten, daß die Erwärmung durch Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste nur durch zusätzliche Maßnahmen in zulässigen Grenzen gehalten werden kann.

### Literatur


[1] *Höhne, E.; Kramer, K.:* Gegenseitige Beeinflussung von Stromschienensystemen durch magnetische Felder. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 3, S. 101 – 103
[2] *Gillner, W.; Höhe, E.:* Maschinenschaltanlage und Maschinenableitung des Pumpspeicherwerkes Markersbach. Energietechnik, Leipzig 31 (1981) 7, S. 255 bis 260
[3] *Lunze, K.:* Einführung in die Elektrotechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1973
[4] *Stoye, H. I.; Lökl, H.:* Bestimmung der Temperaturen und der Verlustleistung der Stahlkonstruktion der Maschinenschaltanlage des PSW Markersbach. Bericht 341/1973 TU Dresden, Sektion Elektrotechnik


EA 5383


Achtung Betriebsleiter, Absatzdirektoren, Werbeleiter!

**Haben Sie unseren Lesern schon Ihre Produkte vorgestellt?**

Gezielte Anzeigenwerbung in unserer Fachzeitschrift bedeutet:

**Hoher Werbeeffekt bei niedrigen Kosten**

denn

- die Fachzeitschrift ELEKTRIE wird von Fachleuten in mehr als 25 Ländern der Erde gelesen
- erfahrungsgemäß ist die Werbung dann besonders wirksam, wenn im gleichen Heft Ihre Anzeige zusammen mit einem thematisch passenden Fachartikel erscheint, der auch die Produkte Ihres Betriebes vorstellt.

Ob ganzseitige farbige Anzeigen auf den Umschlagseiten oder Kleinanzeigen im Innenteil Dieses Angebot sollten Sie nutzen! Noch in diesem Jahr. Wir beraten Sie gern!

Bitte rufen Sie uns an: Berlin 2870344

oder schreiben Sie an folgende Adresse:

VEB Verlag Technik
Redaktion ELEKTRIE
DDR — 1020 Berlin
PSF 201


# Doppeltgeschirmter Aufbau einer Meßwertübertagungseinrichtung durch Modifizierung des EGS-Systems


**D. Jahn, KDT; H. Weber, Berlin**

Mitteilung aus dem Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" Berlin (IPH)


### 1. Problemstellung

Für die Übertragung von analogen Signalverläufen von Hochspannungspotential auf Erdpotential wird eine opto-elektronische Meßwertübertragungseinrichtung eingesetzt. Sie besteht aus dem Sender (Modulator und Lumineszenzdiode) auf Hochspannungspotential, dem Empfänger (Demodulator und Fotodiode) auf Erdpotential und dem Lichtwellenleiter (LWL) mit einer 200-µm-Step-Index-Faser. Als Modulationsverfahren wird die Pulspositionsmodulation (PPM) verwendet, die direkt die Lumineszenzdiode (LED) steuert. Darüber wurde in [1] und [2] bereits berichtet.
Trotz der potentialgetrennten Übertragung mittels LWL ist während der Prüfung eine Beeinflussung der Übertragungseinrichtung infolge elektrischer und magnetischer Störfelder sowie kapazitiver und magnetischer Verkopplung vorhanden. Des weiteren führen Erdpotentialanhebungen, bedingt durch die räumliche Trennung (etwa 100 m) zwischen dem Prüfling mit den Meßaufnehmern und den Registriereinrichtungen, zur galvanischen Einkopplung der über die Kabelmäntel fließenden Ausgleichströme in den Nutzsignalkreis. Die Unterdrückung dieser störenden Einflüsse erfordert u. a. einen doppeltgeschirmten Aufbau der Geräte, z. B. die Bypaß- [3] oder Guard-Konstruktion [4].
Auch außerhalb des Hochleistungsprüffeldes bei wesentlich geringerer Störbeeinflussung sind derartige Konstruktionen für die Messung von kleinen Spannungen und Strömen notwendig. Das EGS ist aber für solche Konstruktionen nicht vorgesehen, so daß eine Modifizierung des EGS erforderlich wird.
Im folgenden wird auf die Störbeeinflussung und ihre Unterdrükkung im Hochleistungsprüffeld eingegangen sowie anhand der konstruktiven Gestaltung der Meßwertübertragungseinrichtung über die Modifizierung des EGS für einen doppeltgeschirmten Aufbau (Bypaß) berichtet.

### 2. Störbeeinflussung und ihre Unterdrückung im Hochleistungsprüffeld

Die elektromagnetische Störbeeinflussung läßt sich nach [5] in die drei Bereiche

— Störquelle
— Kopplung und
— störempfindliches System

einteilen. Das Schema der Störbeeinflussung und ihrer Unterdrükkung ist im Bild 1 dargestellt.
Die Maßnahmen zur Unterdrückung der Störbeeinflussung werden getrennt, bezogen auf die Störquelle, auf die Kopplung und auf das störempfindliche System, betrachtet. Unter den speziellen Bedingungen eines Hochleistungsprüffeldes muß aus ökonomischen Gründen davon ausgegangen werden, daß die Unterdrückung der Störbeeinflussung im wesentlichen nur im Bereich der Kopplung und des störempfindlichen Systems erfolgen kann. In einigen Fällen ist es aber sinnvoll und notwendig, die Störquelle mit in die Maßnahmen einzubeziehen.
Nach der Art der Verkopplung zwischen Störquelle und störempfindlichem System werden nach [5] folgende Beeinflussungsarten unterschieden:

— galvanische Beeinflussung
— kapazitive Beeinflussung


Dr.-Ing. *Dietmar Jahn* war z. Z. der Bearbeitung dieses Beitrages Fachgebietsingenieur, Ing. *Helmut Weber* ist Entwicklungsingenieur im Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" Berlin.

— induktive Beeinflussung
— leitungsgebundene Wellenbeeinflussung
— Wellenbeeinflussung durch Strahlung

Im Hochleistungsprüffeld tritt davon im wesentlichen die galvanische Beeinflussung auf [6]. Sie entsteht durch die Verkopplung verschiedener Stromkreise über gemeinsame Impedanzen. In Bild 2 ist die galvanische Beeinflussung prinzipiell dargestellt. Die beiden Stromkreise 1 und 2 sind über die Impedanz $\underline{\mathfrak{Z}}_2$ der gemeinsamen Leitung miteinander verkoppelt, so daß an $\underline{\mathfrak{Z}}_{L1}$ ein kleiner Teil der Spannung $\underline{\mathfrak{U}}_2$ und an $\underline{\mathfrak{Z}}_{L2}$ ein kleiner Teil der Spannung $\underline{\mathfrak{U}}_1$ auftritt. Die beeinflussende Störgröße ist der Strom. Die Reduzierung der galvanischen Beeinflussung wird erreicht durch Verkleinern der Koppelimpedanz oder durch Potentialtrennung.
Wenn die Koppelimpedanz Null wird, spricht man von der galvanischen Entkopplung. Die beiden einander beeinflussenden Stromkreise sind dann nur in einem Punkt miteinander verbunden. Die galvanische Entkopplung ist in Bild 3 dargestellt.
Die Potentialtrennung wird auch als galvanische Trennung bezeichnet. Sie läßt sich erreichen
— elektro-mechanisch mittels Relais
— elektro-magnetisch mittels Transformator
— elektro-optisch mittels LWL.

In [3] wird ausgeführt, wie eine galvanische Entkopplung mittels Bypaß-Konstruktion realisiert werden kann. Durch Aufteilung des Nutz- und Störkreises und nur durch Verbinden an einem Punkt sowie durch doppelte Schirmung der Meßeinrichtung wird eine Bypaß-Konstruktion erzielt. Dadurch wird verhindert, daß Mantelströme sich in Koaxialkabeln dem Nutzsignal überlagern. In Bild 4 ist der Meßaufbau in Bypaß-Technik dargestellt. Die beiden Schirme des Meßkabels liegen bei der Signalquelle gemeinsam auf Erdpotential. Am Registriergerät hingegen liegt der äußere Schirm des Kabels an einer geerdeten Schirmkabine, die zur Aufnahme des Registriergerätes dient. Bei diesem Aufbau fließt der Störstrom aufgrund der Stromverdrängung und der großen Impedanz zwischen innerem Schirm und Schirmkabine (kleines $C_E$) vorzugsweise auf dem äußeren Schirm, d.h. er fließt an der eigentlichen Meßeinrichtung vorbei. Der Schirm wird deshalb als Bypaß bezeichnet.
Desweiteren muß die hochfrequenzmäßige Kopplung der Meßeinrichtung zum 220-V/50-Hz-Netz möglichst klein sein. Dies wird entweder durch Störschutzfilter oder durch kapazitätsarme Trenntransformatoren in der Netzzuleitung erreicht. Dabei ist zu beachten, daß die Leitungen vor und nach dem Filter bzw. Trenntransformator räumlich getrennt, möglichst in getrennten Kammern verlegt werden. Der Aufbau des Meßgerätes in der Schirmkabine soll kapazitätsarm erfolgen (kleines $C_E$ in Bild 4). Die Bypaß-Konstruktion ist auch gegen die o.a. weiteren 4 Beeinflussungen wirksam.
Die Guard-Konstruktion ist ebenfalls anwendbar. Sie verfügt prinzipiell auch über einen doppeltgeschirmten Gehäuseaufbau; nur die Erdung der Meßkabel am Meß- und Registrierort ist gegenüber der Bypaß-Technik verändert.

## 3. Konstruktive Gestaltung

### 3.1. Untersuchung verschiedener Varianten

Untersucht man das EGS in Hinblick auf seine Eignung für ein Gefäßsystem in Bypaß-Konstruktion, so lassen sich zwei Lösungsvarianten erkennen.

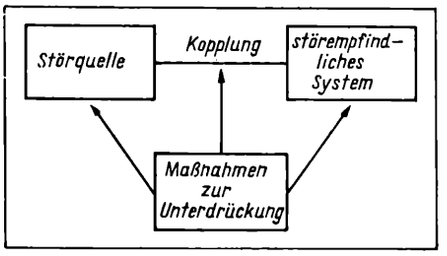
*Variante 1:*

Die geschirmten Karteneinschübe werden als innerer Schirm benutzt, der Baugruppenträger erhält das Potential des äußeren Schirms und wird in ein neu zu konstruierendes Gehäuse gebracht.

*Variante 2:*

Der Baugruppenträger wird geschirmt und erhält das Potential des inneren Schirms. Diese Baugruppe wird dann isoliert in ein neu zu konstruierendes Gehäuse gebracht.
Bei Variante 1 sind die geschirmten Karteneinschübe durch die Gleitschienen gegenüber dem Baugruppenträger isoliert. Sie können als innerer Schirm dienen. Demnach müßte noch die Frontplatte vom Kartenrahmen isoliert werden (z.B. durch Drehen des Klotzes für die Befestigung), so daß sie Bestandteil des äußeren Schirmes ist. Die Buchsenleisten werden in den inneren Schirm mit einbezogen.
Problematisch ist die sichere Isolation der Karteneinschübe im Bereich der Buchsenleisten sowie die Einbeziehung der Buchsenleisten in den inneren Schirm. Alle Bedienelemente, wie Schalter, Potentiometer usw. müssen mit isolierten Wellen durch beide Schirme nach außen geführt werden. Das Angebot an derartigen Bedienelementen ist sehr klein. Aufgrund der kleinen Abstände zwischen den Kartenrahmen und dem Baugruppenträger erhält man für hochfrequente Störgrößen eine noch zu große Koppelkapazität sowie eine geringe Spannungsfestigkeit. Ein derartiger Aufbau wird wahrscheinlich den Anforderungen in üblichen BMSR-Anlagen der Industrie genügen. Für den Einsatz unter den Bedingungen eines Hochleistungsprüffeldes ist die Variante 1 jedoch nicht ausreichend.
Die Variante 2 ist unproblematisch im Aufbau, da alle handelsüblichen Bedienelemente eingesetzt werden können. Die Bedienelemente sind nach dem Öffnen einer Klappe im Gehäuse (äußerer Schirm) zugänglich. Die erforderlichen doppeltgeschirmten Meßkabel werden durch Schlitze in dieser Klappe auf die Frontplatte der Karteneinschübe (innerer Schirm) geführt. Dabei wird der äußere Schirm des Meßkabels über einen kurzen flexiblen Draht mit dem Gehäuse (äußerer Schirm) verbunden, während der innere Schirm

**Bild 1.** Schema der Störbeeinflussung und ihrer Unterdrückung



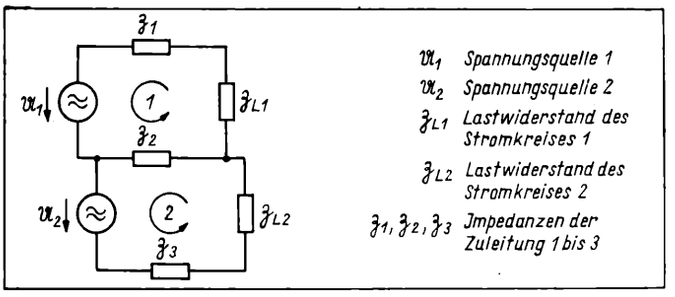




**Bild 2.** Galvanische Beeinflussung

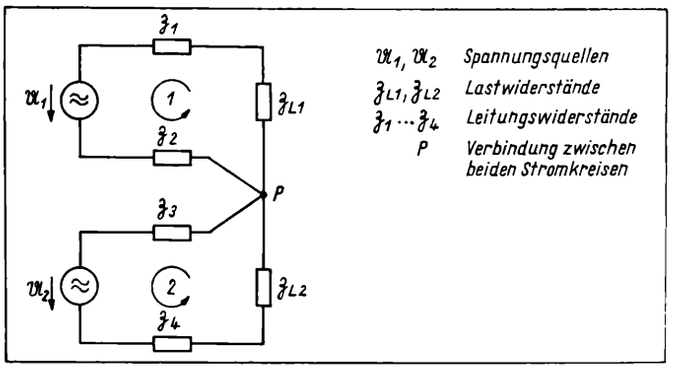
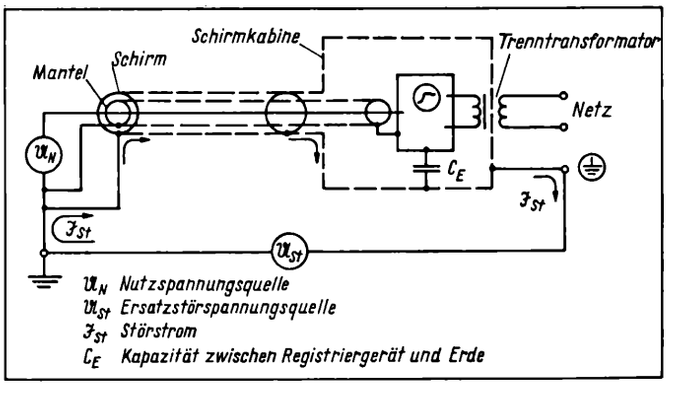



**Bild 3.** Galvanische Entkopplung

**Bild 4.** Meßaufbau in Bypaß-Technik



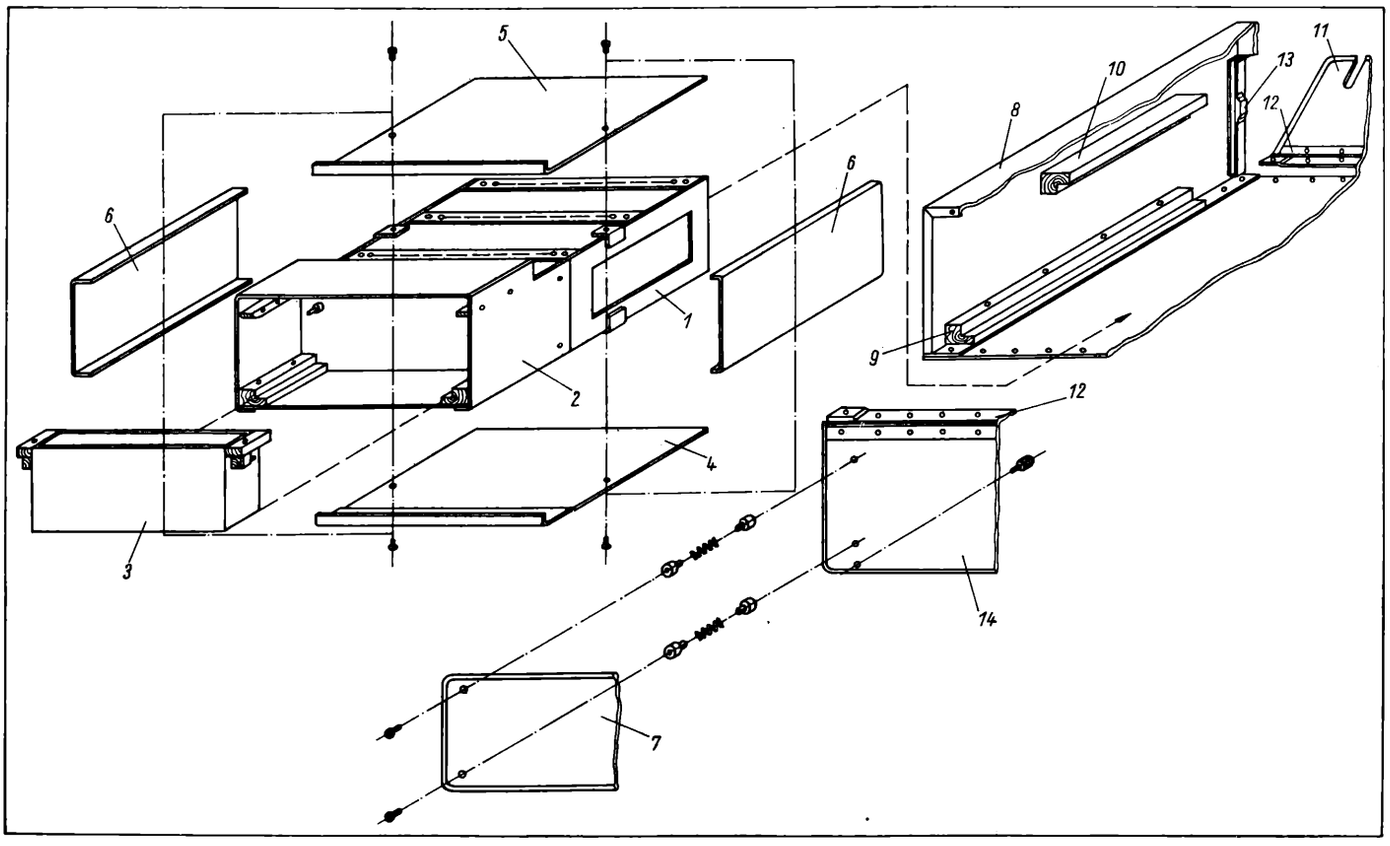



**Bild 5.** Konstruktive Gehäusegestaltung in Bypaß-Technik

und die Seele des Meßkabels mittels üblicher Koaxialsteckverbinder an die elektronischen Baugruppen innerhalb des inneren Schirms geführt werden.
Der Abstand zwischen innerem und äußerem Schirm ist bei dieser Variante frei wählbar, so daß sich die Konstruktion gut an die Prüffeldbedingungen anpassen läßt. Die Schlitze in der Gehäuseklappe sowie die Verbindung der äußeren Schirme der Meßkabel mit dem Gehäuse stellen eine gewisse Inkonsequenz dar, die aus dem fehlenden Angebot doppeltgeschirmter koaxialer Steckverbinder (s. auch Variante 1) resultiert.

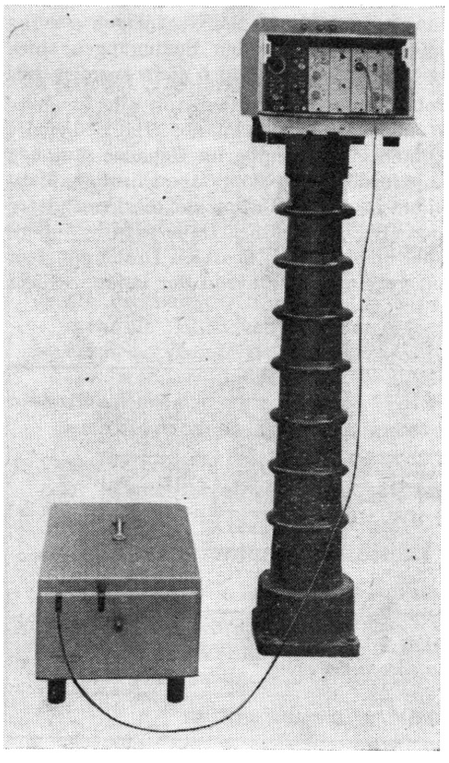


**Bild 6.** Optoelektronische Meßwertübertragungseinrichtung

### 3.2. Realisierung nach Variante 2

Der konstruktive Aufbau gemäß Variante 2 ist mit Blick von hinten im Bild 5 dargestellt. Die Aufnahme *1* kann alle kleineren Gefäßeinheiten vom EGS aufnehmen. Das Teil *2* wird an die Aufnahme *1* angeschraubt und dient zur Aufnahme der Batteriekassette *3*. Die Teile *4* bis *6* werden zur vollständigen Schirmung der Aufnahme *1* verwendet, einschließlich des Raumes für den Verdrahtungsrahmen und für die Buchsenleisten. Die Vorderseite der Aufnahme *1* wird dabei durch die Frontplatte der Karteneinschübe geschirmt (im Bild 5 nicht dargestellt). Der Batterieraum wird durch Teil *7* nach hinten geschirmt. Die Teile *1* bis *7* dienen der Aufnahme der elektronischen Baugruppen und führen das Potential des inneren Schirms.
Das Gehäuse *8* enthält die aus Hartgewebe gefertigten Gleitschienen *9* und *10* zur isolierten Aufnahme aller zum inneren Schirm gehörenden Teile. Die Klappe *11* ist über das Scharnierband *12* am Boden des Gahäuses *8* befestigt. Sie wird im geschlossenen Zustand vom Magnetverschluß *13* gehalten. Im geöffneten Zustand sind die Frontplatten der Karteneinschübe zur Bedienung zugänglich. Über die Klappe *14* ist der Batterieraum zu erreichen. Sie trägt die isoliert und federnd befestigte Platte *7*, die auf dem Potential des inneren Schirms liegt und die Batteriekassette im Batterieraum festklemmt.

## 4. Stromversorgung

Für den optischen Sender auf Hochspannungspotential ist eine erdfreie Stromversorgung erforderlich. Das gleiche gilt auch für den optischen Empfänger, da Erdpotentialanhebungen zwischen Empfänger und Registrierort auftreten. Als erdfreie Stromversorgung dienen für die optoelektronische Meßwertübertragungseinrichtung wiederaufladbare Nickel-Kadmium-Batterien.
Es befinden sich jeweils 5 Nickel-Kadmium-Batterien (1, 2 V/12 Ah) in einer Batteriekassette, die rückseitig in das Sender- oder Empfängergehäuse eingesteckt wird. Die jeweiligen Versorgungsspannungen ($\pm$ 12 V und 5 V) werden mit Gleichspannungsumsetzern erzeugt. Die Gleichspannungsumsetzer sind vollständig geschirmt. Alle in die Schirmgehäuse führenden Leitungen werden über Filter geführt, welche in mehrere Kammern aufgeteilt sind.

*Fortsetzung auf Seite 107*

# Simulation von Schaltungen der Leistungselektronik mit Hilfe programmierbarer Kleinstrechner, Teil 3

Programmierbare Tisch- und Taschenrechner sowie Heim- und Personalcomputer eröffnen auch für die digitale Simulation von Schaltungen der Leistungselektronik neue Möglichkeiten. Im vorliegenden dritten Teil[1]) der Artikelserie werden Bauelemente der Leistungselektronik, wie z. B. Dioden und Thyristoren sowie Leistungstransistoren im Schaltbetrieb, als Modelle idealer Schalter in die Simulation einbezogen. Die Darstellung erfolgt am Beispiel eines Kommutierungskreises und einer einfachen Wechselrichterschaltung.

F. Fischer, KDT; W. Retzlaff, KDT

## 5. Schalterbauelemente im Simulationsprogramm

Die Schaltungen der vorangegangenen Beispiele ließen sich durch DGL-Systeme beschreiben, die über die gesamte Dauer einer Simulation unverändert blieben. Enthält die Schaltung jedoch z. B. Dioden, Thyristoren oder Leistungstransistoren, dann ist diese Konstanz nur bis zum Umschalten eines Bauelementes gegeben. Danach befindet sich die Schaltung in einem neuen Zustand, und das DGL-System ist dementsprechend verändert.
Die Art dieses Übergangs wird von der Struktur des Bauelemente-Modells bestimmt. In der vorliegenden Arbeit soll die Annahme idealer Schalter gelten. Der Durchlaßwiderstand sei Null, der Sperrwiderstand unendlich und das Umschalten erfolge sprungförmig.

### 5.1. Beispiel Thyristorkreis

Als Beispiel veranschaulicht ein Kommutierungskreis mit Thyristor diese Verhältnisse (Bild 6a). Bei leitendem Thyristor gilt das DGL-System

$$L\,(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = U_d - u \qquad (13)$$

$$C\,(\mathrm{d}u/\mathrm{d}t) = i - u/R. \qquad (14)$$

Bei gesperrtem Thyristor verschwindet die linke Masche der Schaltung; Gl. (13) wird unwirksam und $i = 0$. Lediglich der Entladevorgang des Kondensators $C$ setzt sich fort; dementsprechend gilt Gl. (14) mit $i = 0$ weiterhin.
Das in das Simulationsprogramm einzuführende Thyristormodell hat demnach hauptsächlich folgende Funktionen auszuführen:

- Festlegung des neuen Leitzustandes des Thyristors in Abhängigkeit von dessen bisherigem Leitzustand, von Variablen der Schaltung und von der Zündinformation
- Auswahl des gültigen DGL-Systems in Abhängigkeit vom Leitzustand des Thyristors.

Dr.-Ing. *Friedrich Fischer* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung der AdW, Dresden. Dipl.-Ing. *Werner Retzlaff* ist Entwicklungsingenieur im VEB Steremat „Hermann Schlimme" Berlin.

Teil 1 dieser Artikelserie ist in ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 1, S. 14 – 16,
Teil 2 in Heft 2, S. 64 – 67, erschienen.

Tafel 8 enthält die entsprechenden Programmveränderungen und -ergänzungen dieses Beispiels, die zusammen mit dem Hauptprogramm (Tafel 3) und dem „Oszilloskop" (Tafel 5) gelten (siehe Teil 2). Dargestellt werden die Thyristorspannung $u_T$, die Kondensatorspannung $u$, der Strom durch die Induktivität $i$ sowie der Zündpuls $ZP$.
Im UP AUSGABE wird wiederum die Zuordnung der Meßgrößen zu den einzelnen Kanälen des „Oszilloskops" vorgenommen (Zeilen 3030 bis 3060). Die Thyristorspannung $u_T$ ist zuvor in Abhängigkeit vom Ventilzustand $V$ zu berechnen (Zeilen 3010 und 3020).
Im UP STG (Steuergerät) wird zu drei Zeitpunkten jeweils ein Zündpuls der Breite 125 µs gebildet (Zeilen 4010 und 4020).
UP VENTILE enthält das Thyristormodell, das wie die anderen Unterprogramme einmal je Integrationsschritt aufgerufen wird. Möglichkeiten für das Umschalten in den Leitzustand bzw. in den Sperrzustand werden in den Zeilen 6010 und 6020 geprüft. Trifft keine dieser Bedingungen zu, so bleibt der bisherige Zustand während des folgenden Schrittes erhalten.
Der Leitzustand ($V = 1$) wird erreicht, wenn ein Zündpuls $ZP$ vorliegt und gleichzeitig die Thyristorspannung $u_T$ positiv ist.
Der Sperrzustand ($V = 0$) wird eingeleitet, wenn der Thyristorstrom negative Werte annimmt. Hiernach ist diese Zustandsvariable, $F$ (1), nullzusetzen.
Im UP DGL steht das DGL-System, dessen erste Gleichung nun vom Schaltzustand des Thyristors abhängt. Der Zuwachs des Stromes wird bei $V = 1$ gemäß Gl. (13) gebildet und ist Null bei $V = 0$ (Zeilen 7010 und 7020). Die DGL der Kondensatorspannung wird in beiden Fällen nach Gl. (14) ausgewertet (Zeile 7030).
Bild 6b zeigt entsprechende Verläufe für die dort angegebenen Schaltungsgrößen und Maßstäbe. Vor dem Auftreten des ersten Zündpulses bei $t = 250\,\mu s$ sind der Strom durch die Induktivität $i$ und die Kondensatorspannung $u$ Null. Die Thyristorspannung $u_T$ ist gleich der Speisespannung $U_d$. Nach der Zündung fließt durch den Thyristor ein halbsinusförmiger Strom, der zu einer Aufladung des Kondensators auf nahezu $2\,U_d$ führt. Mit Stromnulldurchgang verlischt der Thyristor. Über dem Bauelement liegt die Sperrspannung $u_T = U_d - u$, die infolge Entladung des Kondensators über $R$ im Abnehmen begriffen ist. In diesem Betriebszustand ist der

*Fortsetzung von Seite 106*

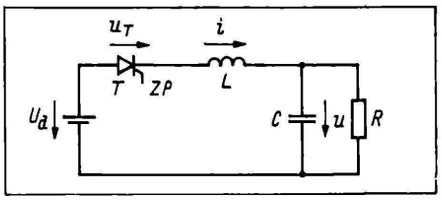
## 5. Zusammenfassung

Die doppelte Schirmung der elektronischen Baugruppen durch die Modifizierung des EGS ist für eine wirksame Unterdrückung der elektromagnetischen Störbeeinflussung, insbesondere der galvanischen Beeinflussung im Hochleistungsprüffeld notwendig. Aber auch bei wesentlich geringerer Störbeeinflussung kann sie für die Messung von kleinen Spannungen und Strömen verwendet werden.
Die optoelektronische Meßwertübertragungseinrichtung stellt eine realisierte Variante des doppeltgeschirmten Aufbaus durch Modifizierung des EGS dar.
Zukünftig könnte die konstruktive Gestaltung des Gehäuses (äußerer Schirm) durch ein Angebot von doppeltgeschirmten Koaxialsteckern seitens der Industrie wesentlich vereinfacht werden.

## Literatur

[1] *Jahn, D.:* Analoge optoelektronische Meßwertübertragung von Hochspannungspotential in einem Hochleistungsprüffeld. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 3, S. 123 bis 126
[2] *Jahn, D.:* Optoelektronische Übertragung des auf Hochspannungspotential gemessenen Löschmittel-Druckverlaufs in ölarmen Leistungsschaltern. ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 9, S. 325 – 327
[3] *Schwab, A.; Herold, J.:* Elektromagnetische Interferenzerscheinungen während der Messung schnell veränderlicher hoher Spannungen. Archiv für technisches Messen. Blatt V 3362-5 (Okt. 1973), Lfg. 453
[4] *Eckert, K.:* Störspannungen bei digitaler Meßwerterfassung und ihre Unterdrükkung. radio fernsehen elektronik, Berlin 24 (1975) 17, S. 555 – 558
[5] *Stoll, D.* (Hrsg.): EMC-Elektromagnetische Verträglichkeit. Berlin: Elitera-Verlag 1976
[6] *Weber, H.:* Literaturbericht zu Störbeeinflussungsproblemen in den Hochleistungsprüffeldern LB 1/81-HE, IPH Berlin (nicht veröffentlicht)
[7] *Herrmann, U.; Pliet, H.:* Electromagnetic compatibility of measuring and control circuits in high-power test laboratories. 5. Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zürich, März 1983

EA 5456



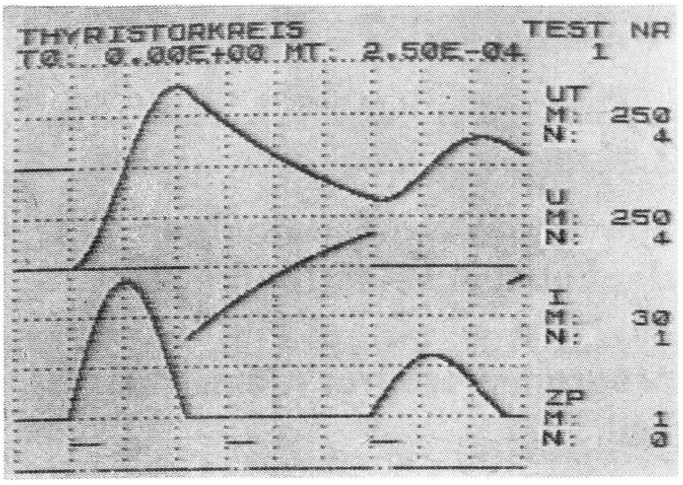
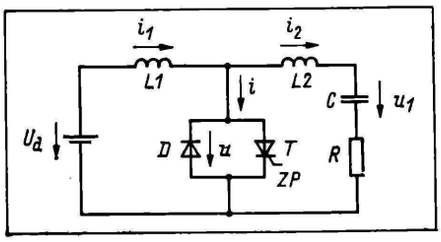




**Bild 6.** Simulationsbeispiel Thyristorkreis
a) Schaltung
b) Oszillogramme einer Simulation für $U_d = 500$ V, $L = 1$ mH, $C = 25\,\mu$F, $R = 40\,\Omega$. Zeitmaßstab MT = 250 µs/RE
$u_T$ (250 V/RE), $u$ (250 V/RE), $i$ (30 A/RE), $ZP$ (0,5 V/RE).
Verfahren: Mod. Euler. 2. Ordnung, Schrittweite DT = 4 µs

Thyristor funktionsgemäß nicht zündbar, wie mittels eines „Störpulses" (hier bei $t = 1000\,\mu$s) überprüft werden kann. Zum Zeitpunkt des dritten Zündpulses, bei $t = 1750\,\mu$s, ist die Kondensatorspannung $u$ unter den Wert der Speisespannung $U_d$ abgesunken, so daß wiederum positive Thyristorspannung vorliegt. Der Thyristor wird leitend, wegen der verbliebenen Gegenspannung verläuft der Aufladevorgang jedoch mit geringerer Intensität. Die Rechenzeit beträgt 12 min (HC-900).

### 5.2. Unterprogramm VENTILE

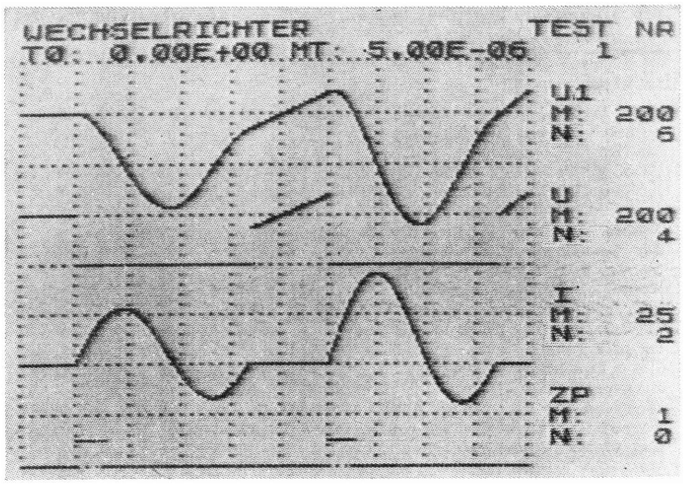
Im folgenden sollen weitere typische Halbleiter-Leistungsbauelemente, wie Diode, GTO und Transistor im Schaltbetrieb, in die Modellierung einbezogen werden. Tafel 9 enthält die entsprechenden Umschaltbedingungen. Diese allgemein formulierten Unterprogramme sind Bestandteil des UP VENTILE und werden, entsprechend der Anzahl eingesetzter Bauelemente jeder Art, einmal oder mehrmals pro Schritt aufgerufen.
Mit dem Aufruf sind die Werte von Strom und Spannung an den Klemmen des Bauelementes sowie der bisherige Ventilzustand an die Modellgrößen $IV$, $UV$, $V$ zu übergeben. Bei Thyristoren und Transistoren kommt hierzu noch die Steuerinformation. Als Resultat wird der für den folgenden Schritt gültige Ventilzustand $V$ rückübergeben. Eine derartige Programmtechnik führt in BASIC zunächst zu vergrößertem Aufwand, ist aber wegen der erreichbaren Übersichtlichkeit letztlich vorteilhaft. Außerdem wird ein Übergang auf Programmiersprachen mit besseren Strukturierungsmöglichkeiten erleichtert.
Für eine Schaltung mit $n$ Ventilen erhält das Unterprogramm VENTILE generell folgenden Aufbau:

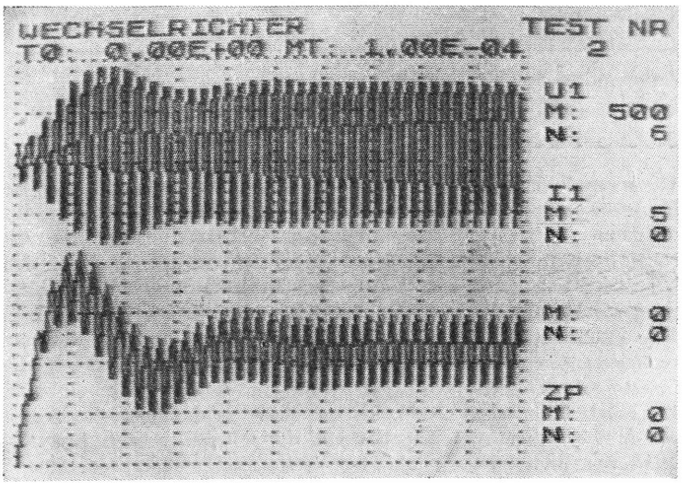



1. Bestimmung der gültigen Strom- und Spannungswerte aller Ventile aus den Zustandsvariablen. Die Art der Verknüpfung zwischen Zustandsvariablen und Ventilgrößen hängt vom aktuellen Gesamtzustand der Schaltung ab. Demnach sind die Zustände sämtlicher Ventile zu berücksichtigen, was bei $n$ Bauelementen theoretisch zu $2^n$ Möglichkeiten führen kann. Diese Zahl läßt sich jedoch in der Regel durch einfache Überlegungen wesentlich einschränken.
2. Übergabe der Größen des ersten Ventiles $IV1$ und $UV1$, des Ventilzustandes $V1$ sowie gegebenfalls des Zündpulses $ZP1$ oder Löschpulses $LP1$ an die Modellgrößen $IV$, $UV$, $ZP$, $LP$.
3. Aufruf des für die Art des Ventiles $1$ gültigen Bauelemente-Modells.
4. Rück-Übergabe von $V$ an $V1$.
5. Wiederholung der Punkte 2. bis 4. für Ventil $2$ bis Ventil $n$.
6. Setzen neuer Anfangsbedingungen bestimmter Variablen entsprechend des durch $V1$ bis $Vn$ charakterisierten veränderten Schaltungszustandes und DGL-Systems. Ein typisches Beispiel ist das Nullsetzen des Ventilstromes nach dessen erfolgtem Nulldurchgang und anschließendem Ausschalten des Bauelementes.

Die Umschaltbedingungen für Diode und Thyristor wurden gegenüber Abschn. 5.1. weiter gefaßt. Nunmehr ist das Einschalten auch über einen positiven Strom und das Ausschalten über eine negative Spannung zugelassen. In üblichen Fällen sind der Strom des gesperrten Ventils wie auch die Spannung des leitenden Ventils vereinbarungsgemäß Null, so daß die bisherige Funktionsweise unverändert bleibt. In speziellen Fällen, bei Schaltungsanordnungen mit eingeprägtem Strom oder aufgeprägter Spannung, kann sich diese Erweiterung jedoch als zweckmäßig erweisen.

**Bild 7.** Simulationsbeispiel Wechselrichter
a) Schaltung
b) Oszillogramme einer Simulation für $U_d = 200$ V, $L_1 = 500\,\mu$H, $L_2 = 20\,\mu$H, $C = 0{,}4\,\mu$F, $R = 0{,}707\,\Omega$ (Lastdämpfung $\delta/\omega = 0{,}2$)
Zeitmaßstab MT = 5 µs/RE
$u_1$ (200 V/RE), $u$ (200 V/RE), $i$ (25 A/RE), $ZP$ (0,5 V/RE) Verfahren: Mod. Euler 2. Ordnung, Schrittweite 0,2 µs
c) wie b), jedoch $u_1$ (500 V/RE), $i_1$ (5 A/RE), MT = 100 µs/RE.



**Tafel 8. Programmergänzungen zur Simulation des Kommutierungskreises nach Bild 6a**

```
1220   LET ND=2
1270   LET DT=4E-6
1300   LET N$="THYRISTORKREIS"
1311   LET Y$(1,6)="UT"
1312   LET Y$(2,6)="U"
1313   LET Y$(3,6)="I"
1314   LET Y$(4,6)="ZP"

1331   LET M(1)=250: LET N(1)=4
1332   LET M(2)=250: LET N (2)=4
1333   LET M(3)=30: LET N(3)=1
1334   LET M(4)=1: LET N(4)=0

1350   LET MT=250E-6

1400   LET ZP=0
1499   REM ----------

1500   LET UD = 500
1599   REM ----------

1600   LET V=0
1699   REM ----------

1700   LET F(1)=0
1710   LET F(2)=0
1730   LET L=1E-3
1740   LET C=25E-6
1750   LET R=40
1799   REM ----------

3000   REM UP AUSGABE
3010   IF V=0 THEN LET UT=UD-F(2)
3020   IF V=1 THEN LET UT=0
3030   LET A(1)=UT
3040   LET A(2)=F(2)
3050   LET A(3)=F(1)
3060   LET A(4)=ZP * 0.5
3070   GOSUB 3700: REM UP OSZI
3098   RETURN
3099   REM ----------

4000   REM UP STG
4010   LET ZP=0
4020   IF (T>=250E-6 AND T < 375E-6)
       THEN LET ZP=1
4021   IF (T>=1000E-6 AND T < 1125E-6)
       THEN LET ZP=1
4022   IF (T>=1750E-6 AND T < 1875E-6)
       THEN LET ZP=1
4998   RETURN
4999   REM ----------

5000   RETURN

6000   REM UP VENTILE
6010   IF ZP=1 AND UT>0 THEN LET V=1
6020   IF F(1)<0 THEN LET V=0
6030   IF V=0 THEN LET F(1)=0
6998   RETURN
6999   REM ----------

7000   REM UP DGL
7010   IF V=1 THEN LET K(1)=(UD-Y(2))* DT/L
7020   IF V=0 THEN LET K(1)=0
7030   LET K(2)=(Y(1)-Y(2)/R) * DT/C
7998   RETURN
7999   REM ----------
```

**Tafel 9. Unterprogramme der Schaltermodelle von Diode, Thyristor, GTO und Transistor**

```
6900   REM UP DIODE
6901   IF UV>0 OR IV>0 THEN LET V=1
6902   IF UV<0 OR IV<0 THEN LET V=0
6903   RETURN
6909   REM ----------

6910   REM UP THYRISTOR
6911   IF ZP=1 THEN IF UV>0 OR IV>0
       THEN LET V=1
6912   IF UV<0 OR IV<0 THEN LET V=0
6913   RETURN
6919   REM ----------

6920   REM UP GTO
6921   IF LP=1 THEN LET V=0: RETURN
6922   GOSUB 6910: REM UP THYRISTOR
6923   RETURN
6929   REM ----------

6930   REM UP TRANSISTOR
6931   LET V=0
6932   IF ZP=1 THEN LET V=1
6939   REM ----------
```

**Tafel 10. Programmergänzungen zur Simulation des Wechselrichters nach Bild 7a, Test Nr. 1**

```
1220   LET ND=3
1270   LET DT=2E-7
1300   LET N$="WECHSELRICHTER"
1311   LET Y$(1,6)="U1"
1312   LET Y$(2,6)="U"
1313   LET Y$(3,6)="I"
1314   LET Y$(4,6)="ZP"

1331   LET M(1)=200: LET N(1)=6
1332   LET M(2)=200: LET N(2)=4
1333   LET M(3)= 25: LET N(3)=2
1334   LET M(4)= 20: LET N (4)=0

1350   LET MT=5E-6

1400   LET ZP=0
1410   LET TS=20E-6
1420   LET FS=40000
1430   LET TZ=2.5E-6
1499   REM ----------

1500   LET UD=200
1599   REM ----------

1600   LET V1=0: REM (T)
1610   LET V2=0: REM (D)
1699   REM ----------

1700   LET F(1)=0
1710   LET F(2)=0
1720   LET F(3)=UD
1721   REM
1730   LET L1=500E-6
1740   LET L2=20E-6
1750   LET C=0.4E-6
1760   LET R=0.707
1799   REM ----------

3000   REM UP AUSGABE
3010   IF V1=1 OR V2=1 THEN
       LET U=0: LET I=F(1)-F(2):
       GOTO 3030
```

**Fortsetzung von Tafel 10.**

```
3020   LET U=UD-F(1) * R-F(3)
3021   LET U=U * L1/(L1+L2)
3022   LET U=UD-U
3023   LET I=0
3024   REM
3030   LET A(1)=F(3)
3040   LET A(2)=U
3050   LET A(3)=F(1)-F(2)
3060   LET A(4)=ZP * 0.5
3070   GOSUB 3700: REM UP OSZI
3098   RETURN
3099   REM ----------

4000   REM UP STG
4010   LET ZP=0
4020   IF TS>=1/FS THEN LET TS=0
4030   IF TS<TZ THEN LET ZP=1
4040   LET TS=TS+DT
4998   RETURN
4999   REM

6000   REM UP VENTILE
6010   LET IV=I
6020   LET UV=U
6030   LET V=V1
6040   GOSUB 6910: REM UP THYRISTOR
6050   LET V1=V
6051   REM
6060   LET IV=-I
6070   LET UV=-U
6080   GOSUB 6900: REM UP DIODE
6090   LET V2=V
6091   REM
6100   IF V1=0 AND V2=0 THEN
       LET F(2)=F(1)
6998   RETURN
6999   REM ----------

7000   REM UP DGL
7010   LET K(3)=Y(2) * DT/C
7020   IF V1=1 OR V2=1 THEN GOTO 7060
7030   LET K(1)=(UD-Y(3)-Y(1) * R) * DT/
       (L1+L2)
7040   LET K(2)=K(1)
7050   RETURN
7060   LET K(1)=UD * DT/L1
7070   LET K(2)=(-Y(3)-Y(2) *R) * DT/L2
7998   RETURN
7999   REM ----------
```

**Tafel 11. Programmveränderungen für Test Nr. 2**

```
1311   LET Y$(1,6)="U1"
1312   LET Y$(2,6)="I1"
1313   LET Y$(3,6)=""
1314   LET Y$(4,6)=""

1331   LET M(1)=500: LET N(1)=6
1332   LET M(2)= 5: LET N(2)=0

1333   LET M(=)= 0: LET N(3)=0
1334   LET M(4)= 0: LET N(4)=0

1350   LET MT=1E-4

3040   LET A(2)=F(1)
```

Das Schaltermodell des Transistors beschränkt sich hier auf die Verknüpfung des Ventilzustandes $V$ mit einem „Zündpuls" $ZP$, der ausreichende Ansteuerbedingungen repräsentieren soll.

Moderne Halbleiter-Leistungsbauelemente sind häufig in Rückwärtsrichtung leitend oder erfordern die externe Beschaltung mit einer antiparallelen Diode. Hierzu zählen rückwärtsleitende und asymmetrische Thyristoren, bestimmte Typen abschaltbarer Thyristoren (GTO), integrierte Bipolartransistor-Strukturen sowie Leistungs-MOSFETs. Derartige Anordnungen lassen sich durch aufeinanderfolgenden Aufruf des betrachteten Bauelementes und einer Diode behandeln. Das folgende Beispiel geht auf einen solchen Fall ein.

### 5.3. Beispiel Wechselrichter

Betrachtet wird die Anordnung eines eingliedrigen Reihenwechselrichters mit einem Thyristor und antiparalleler Diode (Bild 7a). Diese Schaltung findet praktische Anwendung in Wechselrichtern kleiner Leistung für die induktive Erwärmung, speziell für induktive Kochplatten [67] [68].

Für die Beschreibung sind zwei Zustände zu unterscheiden. Bei geschlossenem Ventilzweig (Thyristor oder Diode leitend) gilt das DGL-System

$$L_1 (\mathrm{d}i_1/\mathrm{d}t) = U_d \tag{15}$$

$$L_2 (\mathrm{d}i_2/\mathrm{d}t) = -u_1 - i_2 R \tag{16}$$

$$C (\mathrm{d}u_1/\mathrm{d}t) = i_2. \tag{17}$$

Bei geöffnetem Ventilzweig (Thyristor und Diode gesperrt) wird allein die äußere Masche wirksam, wo $L = L_1 + L_2$ und $i_1 = i_2$. Anstelle (15) und (16) tritt

$$L (\mathrm{d}i_1/\mathrm{d}t) = U_d - u_1 - i_1 R. \tag{18}$$

Tafel 10 enthält die Programmveränderungen und -ergänzungen zur Simulation des Wechselrichters, die wiederum in Verbindung mit den Programmen der Tafeln 3 und 5 gelten. Erforderlich sind außerdem die Unterprogramme der Modelle von Thyristor und Diode aus Tafel 9.

Oszillografisch dargestellt werden die Kondensatorspannung $u_1$, die Ventilspannung $u$, der Ventilstrom $i$ sowie der Zündpuls $ZP$ (Zeilen 1311 bis 1314, 3030 bis 3060). Die Ventilgrößen werden am Anfang des UP AUSGABE errechnet, wobei auch hier die zwei Schaltungszustände zu unterscheiden sind (Zeilen 3010 bis 3023). Bei geschlossenem Ventilzweig ist $u = 0$ und $i = i_1 - i_2$. Bei geöffnetem Ventilzweig ist $i = 0$. Für die Ventilspannung wird ein Spannungsteiler aus den beiden Induktivitäten wirksam, so daß

$$u = U_d - u_{L1} \tag{19}$$

mit

$$u_{L1} = (U_d - i_1 R - u_1) (L_1/(L_1 + L_2)).$$

Im „Steuergerät" (UP STG) wird mit der Steuerfrequenz $FS$ ein Zündpuls der Breite $TZ$ gebildet. Hierfür läuft eine interne Steuerzeit $TS$ nach der Art eines Sägezahngenerators mit (Zeilen 4000 bis

4999). Das vorliegende Beispiel arbeitet mit $FS = 40$ kHz und einer Zündpulsbreite $TZ = 2{,}5\,\mu s$. Mit der Voreinstellung von $TS$ wird erreicht, daß die Schaltung nach Simulationsbeginn noch $1/FS - 20\,\mu s = 5\,\mu s$ im Anfangszustand verbleibt, bis der erste Zündpuls eintrifft (Zeilen 1410 bis 1430).
Das Unterprogramm VENTILE weist die im Abschn. 5.2. angegebene Struktur auf. Nach Übernahme der für den Thyristor geltenden Werte von Strom, Spannung und Ventilzustand in die Modellgrößen wird UP THYRISTOR aufgerufen, wonach der neue Ventilzustand $V1$ vorliegt (Zeilen 6010 bis 6050). Analoges wiederholt sich für die Diode (Zeilen 6060 bis 6090). Anschließend werden gemäß Punkt 6 des Ablaufes im Fall eines geöffneten Ventilzweiges die Zustandsvariablen $i_1$ und $i_2$ gleichgesetzt (Zeile 6100).
Bild 7b zeigt für die dort angegebenen Schaltungsgrößen entsprechende Verläufe, die ersten beiden Perioden nach dem Start des Wechselrichters mit zuvor auf $U_d$ aufgeladenem Kondensator. Die Rechenzeit beträgt 6,5 min (HC-900).
Die Hüllkurven eines Einschwingvorganges sind im Bild 7c aufgenommen. Dargestellt werden die Kondensatorspannung $u_1$ und der Eingangsstrom $i_1$ im Zeitmaßstab 100 µs/RE. Die hierfür gültigen veränderten Programmzeilen sind in Tafel 11 angegeben.
Häufig interessiert neben dem Verlauf des Übergangsprozesses der eingeschwungene Zustand selbst. Wie ersichtlich, wird dieser hier etwa 0,7 ms nach dem Start erreicht, wofür es unter den vorliegenden Bedingungen einer Rechenzeit von etwa 90 min (HC-900) bedarf.
Einige zeitgewinnende Maßnahmen mittels rationellerer Abarbeitung der numerischen Integration wurden bereits im Abschn. 4.1. genannt. Weitere Möglichkeiten ergeben sich, wenn allein der stationäre Fall interessiert, durch rechentechnische Verkürzung des Übergangsprozesses. Hierzu zählen die Anwendung von Makromodellen zur Vorausbestimmung des eingeschwungenen Zustandes [69], die Einführung künstlicher Bedämpfungen oder einer zustandsabhängigen Schrittweitensteuerung während der Übergangsphase.
Derartige Elemente „intelligenter" Simulationstechnik werden zweifellos noch an Bedeutung gewinnen. Gleichzeitig wachsen aber auch Bestrebungen zur Anwendung effektiverer Programmiersprachen.

### 5.4. Weitere Bauelemente-Modelle

Wie aus Abschn. 5.2. und dem anschließenden Beispiel zu erkennen ist, erfordert der Einsatz des idealisierten Schaltermodells eine vorherige individuelle Aufbereitung. Sämtliche möglichen Zustände der Schaltung sind zu erfassen und für jeden dieser Fälle ist das gültige DGL-System zu bestimmen.
Eine weitere Modellierungsmöglichkeit besteht darin, in das Schaltermodell endliche Widerstände in Sperr- und Durchlaßrichtung einzuführen. In diesem Fall bleibt die Struktur des DGL-Systems unverändert. Nach dem Umschalten von Ventilen sind lediglich die Koeffizienten neu zu bestimmen. Hieraus erwächst der Vorteil einer leichter formalisierbaren Vorbereitungsphase der Simulation.
Ein Nachteil dieser Methode ist die häufig eintretende Verringerung der kleinsten vorhandenen Zeitkonstante des Systems, was eine Verkleinerung der Schrittweite der numerischen Integration erfordert und damit zur Verlängerung der Rechenzeiten führt. Typische Ursachen sind z. B. kleine Induktivitäten ($di/dt$-Drosseln) in Reihe zu großen Sperrwiderständen der Ventile. In der Folge kann es zum Auftreten steifer DGL-Systeme (s. Abschn. 4.1.) kommen. Zur Abhilfe werden häufig zusätzliche Elemente in das Ventilmodell aufgenommen, wie z. B. eine große Induktivität in dessen Sperrzweig [70], was jedoch wiederum spezielle Maßnahmen in den Umschaltzeitpunkten erfordert.
Mit der weiter rasch wachsenden Leistungsfähigkeit von Kleinstrechnern werden in der Perspektive zweifellos auch komfortablere Programmsysteme zur Schaltungssimulation einsetzbar. Demgegenüber soll das Erfordernis einer eingehenderen Betrachtung der Schaltung vor einer Simulation jedoch nicht ausschließlich als Nachteil aufgefaßt werden. Häufig wird auf diese Weise rascher das gewünschte Verständnis über bestimmte Schaltungszusammenhänge erreicht.
Die bisher betrachteten Modelle gehen von sprungförmigem Umschalten aus, so daß die dynamischen Vorgänge beim Einschalten und Ausschalten des Bauelementes unberücksichtigt bleiben.
Auf Großrechnern werden aufwendige dynamische Modelle für die Untersuchung der inneren Halbleiterstrukturen bereits seit längerem angewendet. Jedoch auch für die Schaltungssimulation entstanden in den letzten Jahren erste dynamische Modelle von Halbleiter-Leistungsbauelementen [4], [71] bis [73]. Die Nutzung dieser Strukturen wie auch deren Weiterentwicklung auf Kleinstrechnern bleibt späteren Arbeiten vorbehalten.

### Literatur


[67] *Peter, J.-M.:* Un nouveau thyristor permet la réalisation d'un onduleur à 40 kHz. Sescosem informations (1976) 3, S. 10 – 17
[68] *Vietson, N. M.; Nakaoka, M.; Maruhashi, T.:* Analysis of a current-fed-type high-frequency inverter using a single reverse-conducting thyristor. IEEE Trans. IECI-26 (1979) 1, S. 35 – 39
[69] *Jagup, V. G.:* Postroenie i izpol'zovanie makromodelej tiristornych preobrazovatelej. Izv. AN SSSR, Energetika i transport (1983) 4, S. 78 – 83
[70] *Celtekligil, U.:* Digital computation of nonlinear differential equations for SCR circuits with the help of fictitious inductances in the equivalent circuits of SCR's. IEEE Trans. IECI-22 (1975) 3, S. 404 – 408
[71] *Avant, R. L.; Lee, F. C.:* A unified SCR model for continuous topology CADA. IEEE/PESC'83 Conf. rec., S. 257 – 268
[72] *Lehnert, K.:* Modellierung von Bipolartransistoren zur digitalen Simulation leistungselektronischer Schaltungen. Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden 30 (1981), 6, S. 153 – 160
[73] *Massobrio, G.:* Modelling of a power transistor using CAD. Pixel, Computer graphics, CAD/CAM, Image processing 4 (1983) H. 2, S. 23 – 28


EA 5552

## Zur Gestaltung von Manuskripten für die Fachzeitschrift ELEKTRIE

Immer wieder erreichen uns Anfragen von Autoren, die wissen wollen, nach welchen Richtlinien Manuskripte für unsere Fachzeitschrift zu gestalten sind.
Deshalb möchten wir an dieser Stelle auf unsere ausführlichen

**Hinweise für Autoren in ELEKTRIE, Berlin 38 (1984), 1, S. 26**

verweisen.
Sie können wesentlich zur einwandfreien Drucklegung Ihres Manuskripts beitragen, wenn Sie diese Hinweise genau beachten. Alle früheren Hinweise für Autoren zur Gestaltung von Manuskripten sind ungültig.
Auf Anforderung versenden wir Sonderdrucke dieser Richtlinie.

Die Redaktion

Wir beenden im Heft 4/1985 die Reihe *Fischer* und *Retzlaff:*

## Simulation von Schaltungen der Leistungselektronik mit Hilfe programmierbarer Kleinstrechner

und setzen die Artikelserie zur ingenieurmäßigen Nutzung der modernen Rechentechnik mit folgenden Beiträgen fort

*Oswald, B.:* **Berechnung des Hochlaufes einer Asynchronmaschine — ein Beispiel zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen**

*Bergner, H.; Seefried, E.:* **Wechselrichteransteuerung mit minimiertem Aufwand — Möglichkeiten des Einsatzes von Einchiprechnern.**

Die Redaktion

# Leipziger Frühjahrsmesse 1985

## Erzeugnisse der Elektroindustrie der DDR

**(Fortsetzung aus Heft 2/1985)**

**Kombinat VEB Lokomotivbau — Elektrotechnische Werke „Hans Beimler" Hennigsdorf**

*Sektor Anlagen der industriellen Elektrowärme*

**Mittelfrequenz-Induktions-Schmiedeerwärmungsanlage IMES-B**

Die neue MF-Schmiedeerwärmungsanlage IMES-B/R 800/0,5 wird zum Erwärmen von Schmiederohlingen (Butzen) eingesetzt.
Besondere Merkmale sind:

- Beschickungseinrichtung für dosierte Entleerung, Nutzmasse 3 t
- robuster Reibradvorschub, der einen geradlinigen, zwangsgeführten, verschleißarmen Werkstücktransport garantiert
- Schnellwechselsystem für die Induktoren
- weiterentwickelter Vibrationsförderer.

Ökonomische Vorteile der Anlage:

- Einsparung von etwa 5% Elektroenergie durch moderne Konzeption des Umrichters;
- das Schnellwechselsystem der Induktoren reduziert die Umrüstzeit auf 30%
- das geschlossene Kühlsystem erlaubt den Einsatz von Wärmepumpen, dadurch kann eine Energierückgewinnung bis zu 20% erreicht werden
- Einsparung von Arbeitszeit durch verringerten Bedienaufwand, erreicht durch effektive Gestaltung des Steuer- und Signalsystems in Kombination mit einer Vielzahl von Automatikfunktionen.

**NF-Induktions-Tiegelschmelzofen NFTO-FE 25000/5500 (Schmelzeinheit)**

Diese Anlage zum Schmelzen sowie zum Warmhalten und Überhitzen der Schmelze von 25 t Gußeisen hat folgende Vorteile:

- Vielfältige Mechanisierungs-, Teilautomatisierungs- und Automatisierungsmöglichkeiten
- Hoher Ausnutzungsgrad der zugeführten Energie durch Erzeugung der Wärme direkt im Schmelzgut
- Intensive Badbewegung, dadurch völlige Durchmischung der Schmelze, keine örtlichen Überhitzungen und damit geringste Abbrandverluste sowie hohe Analysen-Treffsicherheit
- Wirtschaftliches Einschmelzen von Kleinschrott und Spänen bei Vorhandensein eines flüssigen Sumpfes
- Kaltanfahren des Ofens mit „Startblöcken" oder großstückigem Beschikkungsgut möglich
- Anpassung der Leistungszufuhr mittels Regeltransformator, dadurch gute Temperaturführung
- Einfache Herstellung des Tiegels aus saurer, basischer, halbsaurer oder neutraler Stampfmasse
- Geringe Betriebs- und Unterhaltungskosten
- Sauberer Schmelzbetrieb und einfache Bedienung.

Die Schmelzeinheit ist im Kipprahmen gelagert, der seinerseits vom Kippständer aufgenommen wird und über zwei Hydraulikzylinder um etwa 105 Grad zum Abgießen der Schmelze gekippt werden kann (Bild 1 auf der 2. US).
Für Schmelzbetriebe, die aus mehreren NF-Induktions-Tiegelöfen bestehen, kann eine Mikrorechnersteuerung zur optimalen Führung des Schmelzprozesses bereitgestellt werden.

*Sektor Schweißtechnik*

**Universal-Abbrennstumpfschweißmaschine mit Mikroelektroniksteuerung SU 250 E**

Nach der Abbrennstumpfschweißmaschine SU 63 E (Bild 2 auf der 2. US) wurde jetzt auch die Maschine SU 250 E als ein weiterer Vertreter der Typenreihe von Universal-Abbrennstumpfschweißmaschinen mit Mikroelektroniksteuerung ausgerüstet.
Durch Einsatz der Proportionaltechnik in Verbindung mit der Mikroelektronik entspricht die SU 250 E (Stauchkraft 250 kN) in der neuen Ausführung dem fortgeschrittenen internationalen Stand der Technik in dieser Maschinenkategorie.
Die Anwendung der Mikroelektronik ermöglicht eine Energie- und Materialeinsparung von etwa 15% je Schweißung. Mit dem Einsatz der Proportionaltechnik wird eine exakte und genaue Stauchwegeinstellung von 0,1 mm erreicht. Die hohen Gebrauchseigenschaften der SU 250 E sind unter anderem durch hohe Zuverlässigkeit und Exaktheit der Schweißungen mit hoher Maßhaltigkeit gekennzeichnet. Das hohe Niveau der SU 250 E wird durch die Parameter Nennschweißquerschnitt, Anschlußleistung, Steuerungsart sowie durch geringe Umweltbelastung und den Service sichtbar.

*Sektor Oberflächentechnik*

**Lösungsmittelabhängige Abluftregelung für Lacktrockner**

Im LEW-Kombinatsbetrieb VEB Infrarot-Anlagen Oranienburg wurde zum Einsatz in Lackieranlagen eine lösungsmittelabhängige Abluftregelung entwickelt. Durch kontinuierliche meßtechnische Erfassung der Lösungsmittelkonzentration in der Trockenatmosphäre wird die Abluftmenge in Abhängigkeit von den Meßergebnissen geregelt und dadurch der energetische Aufwand zur Beheizung der Trockneratmosphäre verringert. Die lösungsmittelabhängige Abluftregelung besteht aus einem Meßgasanalysator für die kontinuierliche Lösungsmittelkonzentrationsmessung im Trocknerraum und einer Steuereinrichtung. Das Meßverfahren beruht auf dem paramagnetischen Verhalten von Sauerstoff, wobei der Einfluß der Temperatur, der dem Curieschen Gesetz unterliegt, genutzt wird.
Der Einsatz der Meßgeräte empfiehlt sich besonders für Kammertrockner, Tränklacktrockner und Durchlauftrockner, die mit Werkstücken unterschiedlicher Größe beschickt werden. Die vorgestellte Lösung garantiert bei Durchlaufkonvektionstrocknern im Dauerbetrieb eine Energieeinsparung von 33% der Abluftwärme.
Im Sektor Oberflächentechnik werden außerdem Baugruppen des Drahtgalvanisierautomaten DGA 012 (Bild 3 auf der 2. US) aus dem LEW-Kombinatsbetrieb VEB Galvanotechnik Leipzig sowie Baugruppen der automatischen Galvanisier-Trommelstraße ATS (Bild 4 auf der 2. US) aus dem LEW-Kombinatsbetrieb VEB Industrieofen- und Anlagenbau Güntersberge ausgestellt.

*Sektor Elektroisolierstoffe und kupferkaschierte Schichtpreßstoffe*

**Folienglimmertafeln K 1000-2 für die Kollektorlamellenisolation hochbeanspruchter Motoren**

Das Material K 1000-2, bestehend aus Muskovit-Glimmerpapier und einem Epoxidharz-Bindemittel, erfüllt alle Voraussetzungen für den Einsatz in hochbeanspruchten Kommutatoren (Bild 5 auf der 2. US). Forderungen nach geringer Dickentoleranz der Lamelle, einem günstigen Temperatur-Druck- und Stanzverhalten bestimmten die Entwicklung.
Vorzugsdicken sind 0,37; 0,60; 0,70; 0,78; 0,80; 0,85 mm. Dicken zwischen 0,40 und 1,00 mm können in Stufen von 0,05 mm nach Vereinbarung geliefert werden. Das Lieferformat beträgt 560 mm minus 30 mm und 990 mm minus 30 mm.
Das Material läßt sich bei Verwendung gehärteter Stahlwerkzeuge unkompliziert sägen, drehen, bohren und stanzen. Die Bearbeitung erfolgt in jedem Fall trocken, also ohne den Einsatz von Schmiermitteln.

**LEW-Kupferfolien für die Leiterplattenfertigung**

LEW-Kupferfolien sind hochwertiges Vormaterial für die Herstellung von Basismaterial für gedruckte Schaltungen, zum Beispiel für ein- oder zweiseitig mit Kupferfolie kaschierte Laminate aus verschiedenen

Trägermaterialien. Auch auf extrem dünnen Epoxidharz-Glasgewebe-Laminaten entsprechen diese Kupferfolien höchsten Ansprüchen. Die Folien werden in einem kontinuierlichen Prozeß auf langsam rotierenden Spezial-Zyinderkatoden erzeugt.
Die 0,017-mm-Folie wird vorwiegend für Leiterplatten in der Mikroelektronik eingesetzt (Bild 6 auf der 2. US und Titelbild dieses Heftes).
Außerdem stellt LEW eine Reihe kupferkaschierter Schichtpreßstoffe aus, wie den schwerentflammbaren kupferkaschierten Schichtpreßstoff FR 2-V1 oder das kupferkaschierte Glashartgewebe Cu 040 für die Mikroelektronik.

*Sektor Schienentriebfahrzeuge*

**16 2/3-Hz-Lokomotive Baureihe (BR) 243 in Serienausführung für das Elektrifizierungsprogramm der Deutschen Reichsbahn Industrielokomotiv-Gespann EL 20 für Tieftagebauer in der UdSSR**

*Sektor Konsumgüterprogramm*

In diesem Bereich stellt LEW das Heimwerkersystem ES 160 mit seinen zahlreichen Zusatzeinrichtungen aus dem VEB Galvanotechnik Leipzig aus, dazu aus dem Hennigsdorfer Stammbetrieb den Heimwerker-Bandsägezusatz E/ZBA 450.

K. Heise, Hennigsdorf EA 1876

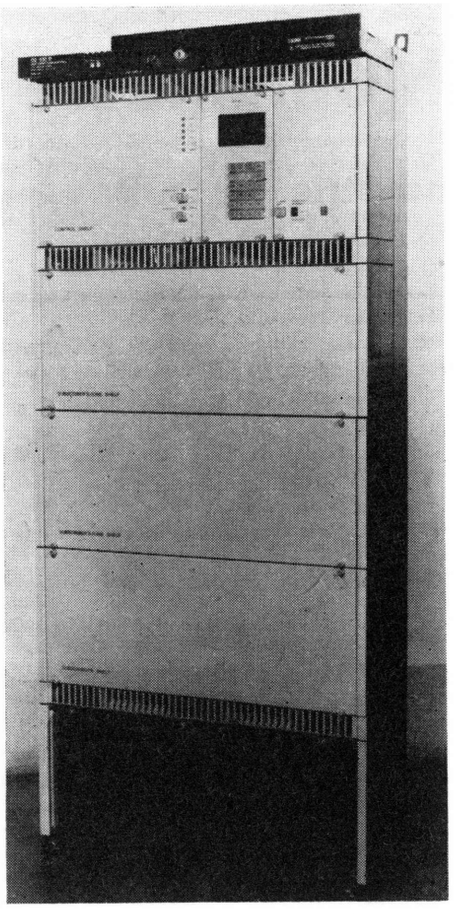


**Bild 2.** Digitale Vermittlungszentrale OZ 100 D

RFT

## VEB Kombinat Nachrichtenelektronik

Die aus Komponenten der Sprach-, Text- und Datenkommunikation bestehende **Anwenderlösung Chefarbeitsplatz** — eine der fünf Anwenderlösungen der RFT-Nachrichtentechnik im Angebotskomplex für die Büro-, Daten- und Telekommunikation — erhält ihren besonderen Akzent durch den neuen mikroprozessorgesteuerten Fernschreiber F 2000 (Bild 1) und den ebenfalls neuen Datenmodem VM 2400. Elektronische Textspeicher, Kurzwahleinrichtung, Wiederholwahleinrichtung, ein vorzügliches Druckbild (auch mit verschiedenen Kursivlagen der Schrift), ungestörter Lokalbetrieb und Möglichkeit des Formularschreibens gehören zu den vielen Anwendungsvorteilen des neuen Endgerätes für die Informationsübertragung bis 200 Baud. Alle Funktionen der Modulation, Demodulation und Steuerung werden digital realisiert. Die **Anwenderlösung Digitale Nachrichtentechnik** vereint Systemlösungen zur zuverlässigen Nachrichtenübertragung über NF-Leitungen, Lichtleiterkabel und Richtfunkeinrichtungen. In ihrem Mittelpunkt steht das Lichtleiter-Nachrichtenübertragungssystem DÜS-LL 8 als Ergänzung des digitalen Übertragungssystems PCM 30/PCM 120. Für den zukunftssicheren Netzausbau mit Lichtleiterkabeln werden Lichtwellenleiter-Schweißgeräte bzw. -Trenngeräte sowie ein durch Neuentwicklungen erweitertes Sortiment an Betriebsmeßgeräten für die Lichtleiter-Übertragungstechnik angeboten.

Über die nachrichtentechnische Erschließung dünnbesiedelter ländlicher Gebiete mittels UKW-Funktechnik, Richtfunkübertragung und digitaler Vermittlung informiert die **Anwenderlösung Landtelefonie.** In ihrem Rahmen wird erstmals die neue Vorfeldeinrichtung VFE 3/12 vorgestellt, mit der sich die zur Verfügung stehenden Anschlußleitungen kleiner, rechnergesteuerter Vermittlungszentralen ökonomisch ausnutzen lassen. Bei Verwendung der elektronischen, digitalen Vermittlungszentrale OZ 100 L (Bild 2), ein Exponat der Anwenderlösung Landtelefonie, als steuernde Zentrale für die Vorfeldeinrichtungen ist eine Erweiterung der möglichen Teilnehmeranschlußzahl von 96 auf 312 gegeben. 288 Teilnehmeranschlüsse stehen davon an 24 Vorfeldeinrichtungen zur Verfügung. 24 Teilnehmer werden direkt an die OZ 100 D angeschlossen. Die OZ 100 D in Verbindung mit Vorfeldeinrichtungen VFE 3/12 stellt damit eine günstige Möglichkeit für den Ausbau bestehender Fernsprechnetze bzw. den Neuaufschluß nachrichtentechnisch zu versorgender Gebiete dar. Kurzwellen-Sende- und Empfangstechnik für den nationalen, internationalen und transkontinentalen Funkverkehr beinhaltet die **Anwenderlösung Funksysteme.** Hauptexponat ist hier das Kurzwellen-Sendesystem KSS 1300. Vielfältiges Zubehör vom Bedienpult bis zur logarithmisch-periodischen Antenne sichert die volle Ausnutzung des hohen Gebrauchswertes dieses rechnergesteuerten Sendesystems der 1-kW-Klasse. Zu den Neuentwicklungen gehören der Bedienwahlschalter KWB 1300, der Antennenwahlschalter KWA 1320 und der Sende-Empfangsumschalter KUF 1300. Einbezogen in die Anwenderlösung Funksysteme sind Feldstärke- und Funkstörmeßplätze.

Daß der VEB Kombinat Nachrichtenelektronik mit seinen Leistungen alle Anwenderforderungen bei Tonstudioanlagen hinsichtlich vielfältigster Gerätekombinationen und Komplettierungsmöglichkeiten erfüllt, verdeutlicht die **Anwenderlösung Tonstudiotechnik.** Als Neuheiten enthält sie u.a. den Regietisch RT 244, bestimmt für die Aufnahme des Mischpultes KSG 244 (Bild 3) und die Weiterverarbeitung der Programmsignale sowie den Equalizer EQ 25.1 (Bild 4).
Innerhalb des Angebotskomplexes „Automatisierung der Produktionsvorbereitung flexibler Fertigungslinien sowie von diskontinuierlichen und kontinuierlichen Pro-

**Bild 1.** Mikroprozessorgesteuerter Fernschreiber F 2000

**Bild 3.** RFT-Kleinstudiogerät KSG 244

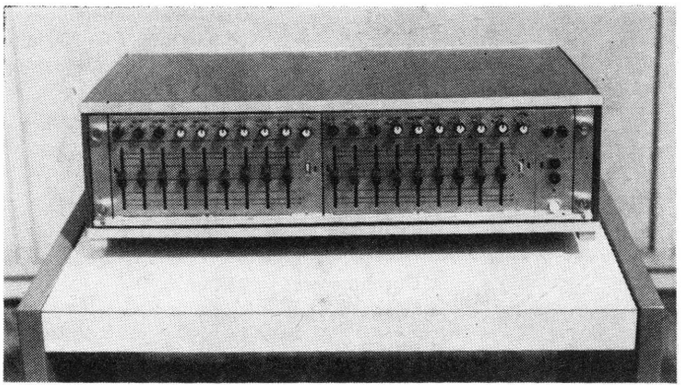


**Bild 4.** RFT-Equalizer EQ 25.1

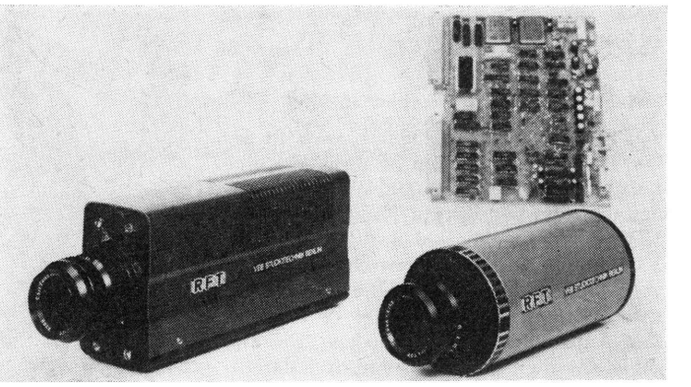


**Bild 5.** Bilderkennungssystem BES 1000, hier die Zeilenfernsehkameras ZFK 1030 und ZFK 1021/1040

zessen in Industrie, Landwirtschaft und Kommunalwesen" stellt das Kombinat Nachrichtenelektronik die **Anwenderlösung Bilderkennungssystem BES 1000** (Bild 5) vor. Sie beinhaltet drei Varianten von CCD-Zeilenfernsehkameras; bei zwei von ihnen erfolgt die Bildauswertung über einen 8-Bit-Rechner, die dritte gestattet den Betrieb ohne Rechner, ist jedoch bei Bedarf ebenfalls rechnergestützt einsetzbar. Mit Hilfe des Bilderkennungssystems lassen sich die Überwachung kontinuierlicher Produktionsprozesse, die Bild- und Zeilenerkennung unter industriellen Bedingungen sowie statistische Messungen realisieren.

Mit vier Anwenderlösungen ist der VEB Kombinat Nachrichtenelektronik im Angebotskomplex „Ausrüstungen und Technologien für die Optimierung von Verkehrs-, Transport- und Lagerprozessoren" vertreten. Der **Dispatcher-Arbeitsplatz** als bedeutendste davon vereint Komponenten der Sprach-, Text- und Datenkommunikation sowie der Bewegtbildübermittlung. Er läßt sich gut in betriebliche Nachrichtennetze einfügen und erlaubt den Einstieg in übergeordnete Betriebs- und öffentliche Netze sowie auch in Funknetze. Anwenderspezifische Hard- und Softwarelösungen gestatten eine flexible Anpassung an vielseitige Nutzerbereiche. Neben dem neuen Fernschreiber F 2000, dem Datenmodem VM 2400 und dem weiterentwickelten Fernbildschreiber FB 3011 (Bild 6) gehört u.a. ein mikrorechnergesteuerter Telefonwählautomat zur Gerätekonfiguration. Er gestattet die Kurzwahl von maximal 40 Zielen.

Die **Anwenderlösung UKW-Verkehrsfunktechnik,** die auf dem breiten Gerätespektrum des UKW-Verkehrsfunksystems U 700 aufbaut, zeigt am Beispiel einer operativen Transportlenkung Möglichkeiten zur Optimierung von Transportprozessen.

Weitere Beispiele möglicher Effektivitätserhöhung von Verkehrs- und Transportprozessen durch RFT-Kommunikationssysteme geben die **Anwenderlösungen Zugfunk** und **Angewandte Fernsehtechnik.**

Hingewiesen sei schließlich noch auf das erweiterte Angebot an Fernsprechgeräten der neuen Generation „Apart", das nunmehr auch Wand- und Konsolenausführungen einschließt. Ebenfalls in Wandausführung wird das Fernsprechgerät im Stil von 1924 „Antique" offeriert.

Aus der Konsumgüterproduktion des Kombinates kommen weiterhin ein Amateurfunkempfänger-Bausatz sowie im Rahmen der Branche Rundfunk und Fernsehen im Handelshof u.a. Lautsprecherboxen, ein

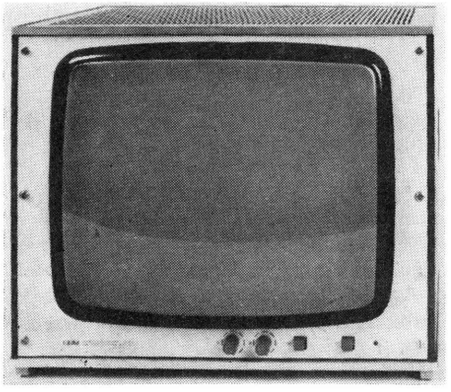


**Bild 6.** Fernbildschreiber FB 3011
Fotos: Werkfoto

Autokassettenrekorder und als Neuheiten Mono- und Stereonachfolgeverstärker, ein Equalizer mit fünf mischbaren Eingängen sowie Hifi-Mikrofone zur Ausstellung. Angeboten werden außerdem kundenspezifische Schaltkreise in Hybridtechnik, LSI- und MSI-Schaltkreise sowie integrierte Widerstandsnetzwerke für nachrichtentechnische Aufgaben.

H. Mittank, Leipzig EA 1889

## Kombinat VEB NARVA „Rosa Luxemburg"

Das lichttechnische Kombinat VEB NARVA „Rosa Luxemburg" produziert ein umfangreiches Sortiment an Lichtquellen und Leuchten zur Lösung der unterschiedlichsten Beleuchtungsaufgaben auf der Grundlage neuester lichttechnischer und energieökonomischer Erkenntnisse. Das NARVA-Ausstellungsprogramm zur Frühjahrsmesse ist in seiner Gesamtheit auf den rationellen Umgang mit Elektroenergie ausgerichtet.

Nachfolgend werden einige ausgewählte Exponate vorgestellt[1]).

[1]) **Anmerkung der Redaktion:**
Wichtige Forschungsergebnisse und weiter interessante Informationen zum Produktionsprogramm des Kombinates VEB NARVA finden Sie im Heft 12/84 der Fachzeitschrift ELEKTRIE, dessen Hauptteil hauptsächlich Beiträge zum thematischen Schwerpunkt Lichttechnik enthält.

### Neue Leuchten für neue Lampen

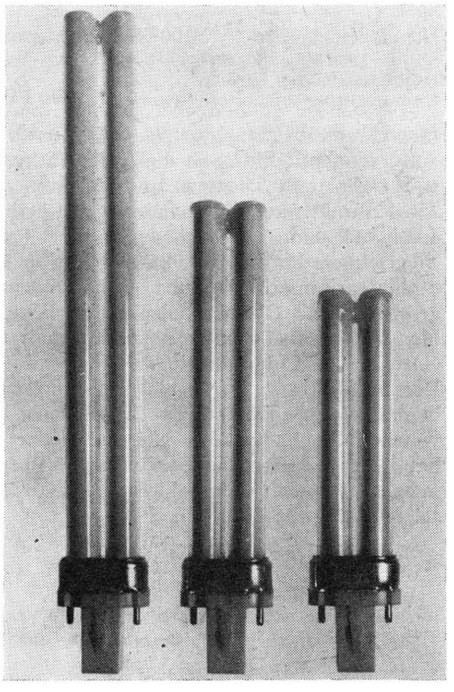
Mit dem neuen Sortiment an Leuchten für Doppelrohrlampen stellt NARVA ein Beleuchtungssystem vor, das voll und ganz auf den rationellen Umgang mit Elektroenergie ausgerichtet ist.

Die Leuchten zeichnen sich durch eine unkomplizierte materialsparende Bauweise aus. Die moderne Formgestaltung ermöglicht einen universellen Einsatz vor allem auch im Wohnbereich. Durch unterschiedliche Oberflächen können die Leuchten in Gestaltungsvarianten integriert werden oder als spezielle Akzentbeleuchtung zur Anwendung kommen.

NARVA produziert die Doppelrohrlampen nunmehr in Ausführungen zu 7, 9 und 11 Watt (Bild 1). Sie stellen eine Alternative zur herkömmlichen Glühlampe dar und sind bei gleichem Lichtstrom für die Leistungstypen 40, 60 und 75 Watt einsetzbar. Die Lichtfarbe kommt der einer Glühlampe gleich. Doppelrohrlampen haben einen Stecksockel mit eingebautem Starter.

Einsparung von Elektroenergie und somit auch von Kosten für die künstliche Beleuchtung sind die entscheidenden Vorteile. Die fünffache Lebensdauer gegenüber der Glühlampe bewirkt, daß sich der Wartungsauf-

**Bild 1.** Doppelrohrlampen in 7-, 9- und 11-Watt-Ausführung



wand verringert und sich die Zuverlässigkeit der Beleuchtungsanlagen erhöht.

### Halogen-Metalldampfstrahler NS 400

Die Strahler sind für einen Einsatz in der UV-Technik vorgesehen. Sie haben eine Leistungsaufnahme von 400 Watt und werden über die Zündgeräte ThZ 175-400 bzw. HQZ 400 und über das Vorschaltgerät VMHD 400 an einer Netzwechselspannung von 220 Volt betrieben. Die bevorzugte Brennstellung ist waagerecht $\pm 15°$.
Zur Anpassung an verschiedene Einsatzgebiete werden die Strahler in drei Varianten gefertigt, die sich im Emissionsspektrum unterscheiden.

1. Die Konzentration der UV-A-Strahlung des Strahlers **NS 400-75** auf das Gebiet 350 bis 380 nm macht diesen Typ besonders für kosmetische Zwecke geeignet. Auch bei der Behandlung von bestimmten Hautkrankheiten, beispielsweise der Akne, sind positive Ergebnisse zu erwarten.
2. Der Strahler **NS 400-76** findet sowohl in der Medizin als auch zur Durchführung einiger technischer photochemischer Prozesse Anwendung. Bedeutende Energieeinsparungen wurden zum Beispiel bei der Aushärtung von Kunstharzen erzielt.
3. In der Kopier- und Mikrofichetechnik zeigt der Strahler **NS 400-77** die besten Ergebnisse.

### Halogen-Infrarotstrahler mit segmentierter Wendel

Dieser moderne Infrarotstrahler ist speziell für den Einsatz in Bürokopiergeräten entwickelt worden.
Die segmentierte Wendel kompensiert einen Helligkeitsabfall zum Strahlerrand hin und garantiert gleichmäßig gute Kopien.
Der NARVA Halogen-Infrarotstrahler HSKB weist folgende technische Parameter auf:

| | |
|---|---|
| Nennspannung: | 200 V |
| Nennleistung: | 800 W |
| Lichtstrom: | 17400 lm |
| Farbtemperatur: | 3200 K |
| Brennstellung: | p 4 |
| Sockel: | R 7 s |
| Nennlebensdauer: | 50000 Schaltungen. |

### Hochleistungsspiegelscheinwerfer N 1000 PH

Das Hauptanwendungsgebiet dieses neuen Scheinwerfers (Bild 2) ist die Ausleuchtung von Bühnen in Theatern und kulturellen Einrichtungen aus Entfernungen von etwa 40 bis zu 150 m.
Das Gehäuse besteht aus einer zweifarbigen Stahlblechkonstruktion und enthält einen geschliffenen Glasparabolspiegel, Ringblende, Schutzgitter und Lampenhalter einschließlich Fokussiertrieb.
Der Scheinwerfer ist in einem Stahlrohrbügel gelagert. Er besitzt 2 unabhängig voneinander bedienbare Neigungsfeststeller, die es gestatten, den Scheinwerfer selbst in engen Räumen zu installieren. Das Gerät zeichnet sich aus durch

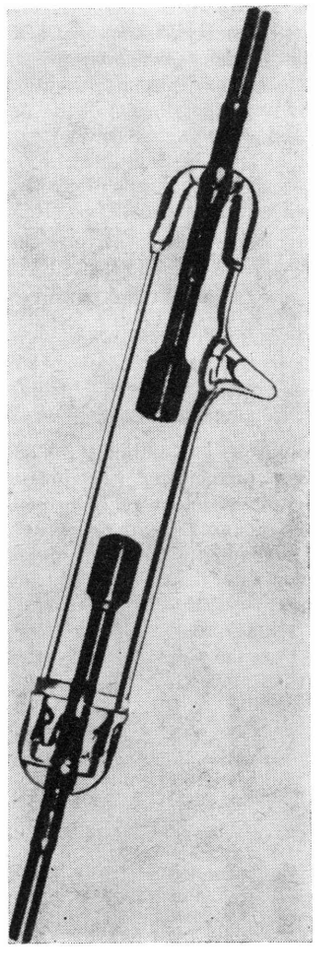
- hohe Servicefreundlichkeit
- abschraubbaren Lampenhalter
- einfach zu betätigende Scheinwerferverstellung und Farbfolienrahmenwechsel
- geringe Gehäusetemperaturen.

**Bild 2.** Hochleistungsspiegelscheinwerfer N 1000 PH

*Technische Daten*

| | |
|---|---|
| Maximallichtstärke $I_{max}$: | 3200000 cd |
| Halbstreuwinkel $\delta_{0,5}$: | 2,5° |
| Lampenbestückung: | Kuppenverspiegelte Lichtwurflampe C 24 V/1000 W, Sockel K 39d |
| Spiegel: | Glasparabolspiegel ∅ 645 mm, $f = 250$ mm mit zentrischer Bohrung ∅ 140 mm |
| Abmessungen: Länge × Breite × Höhe | 550 × 900 × 900 mm |
| Masse (kg): | 32,0 |
| Einschub für Farbfolienrahmen. | |
| Durchmesser: | 712 mm |
| Schwenkbereich: | 360° |
| Kippbereich: | ±90° 45° |
| Schutzgrad: | IP 20 |
| Schutzklasse: | III |
| 3,5 m lange Anschlußleitung. | |

**Bild 3.** Retinophotlampe X 10 6 – 10
Fotos: Werkfoto



### Elektronisches Vorschaltgerät 2 × 32 W

Das System des elektronischen Vorschaltgerätes für 2 Leuchtstofflampen 32 W weist folgende Daten auf:

| | |
|---|---|
| — Netzspannung: | 220 V |
| — Netzfrequenz: | 50 Hz |
| — Lampenbetriebsfrequenz: | etwa 20 kHz |
| — Wirkleistung: | 72 W |
| — cos $\varphi$: | $\geqq 0{,}95$ |
| — Umgebungstemperatur: | −15 °C bis +40 °C |
| — Schutzgrad: | IP 20 |
| — Einbaumaße (für Vorschaltgerät): | Länge — 445 mm, Breite — 42 mm, Höhe — 35 mm, Lochabstand — 430 mm |
| — Oberschwingungsfilter: | induktiv |

Beim Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte ergeben sich im Vergleich zum herkömmlichen (induktiven) Betrieb folgende Vorteile:

- Energieeinsparung 17 W
- Lichtausbeuteerhöhung (System) 20 %
- flackerfreier Start ohne Glimmstarter (kein Verschleißteil)
- direkter Betrieb ohne Blindstromkompensation an Netzspannung (mit Oberschwingungsfilter)
- kein stroboskopischer Effekt durch Verminderung der Lichtstrompulsation
- kein Elektrodenflimmern.

### Retinophotlampe

Die Retinophotlampe mit der Werkbezeichnung XIO 6-10 ist eine luftgekühlte stabförmige Xenon-Impulsentladungslampe, die in einer neuen Gerätegeneration moderner leistungsstarker Netzhautkameras eingesetzt wird (Bild 3).
Die maximale zulässige Einzelblitzenergie beträgt 100 Ws. Ihre mittlere Halbwertsbreite beträgt 3 ··· 10 ms.
Es sind Blitzfolgen von 30 Blitzen bei einer Frequenz von $f = 2$ Hz möglich.
Der Strahlungsschwerpunkt liegt im sichtbaren Spektralbereich. Die Brennstellung der Lampe ist beliebig. Als Wandmaterial findet Kieselglas Verwendung.

G. Bordihn, Berlin EA 1911

In ELEKTRIE Heft 1/85 wurden umfassende Berichte von der 30. Session der CIGRE — Paris 1984 — veröffentlicht. Mit den nachstehend abgedruckten Beiträgen (1. Teil) haben sich die Teilnehmer aus der DDR an den Fachdiskussionen beteiligt. Die weiteren Diskussionsbeiträge werden im Heft 4/85 erscheinen.

Näheres über die Aufgaben, Ziele und die Struktur der CIGRE erfahren Sie im einleitenden Beitrag dieses Heftes auf S. 83 von Prof. Dr.-Ing. O. Müller, Präsident des Nationalkomitees CIGRE der DDR.

Die Redaktion

# Diskussionsbeiträge der DDR-Teilnehmer während der 30. Session in Paris 1984

## Spezielle Prüfanordnungen für Transformatorendurchführungen

*J. Schmidt*, KDT; *K. Janke*, KDT; Berlin

*Diskussionsbeitrag im SC 12*

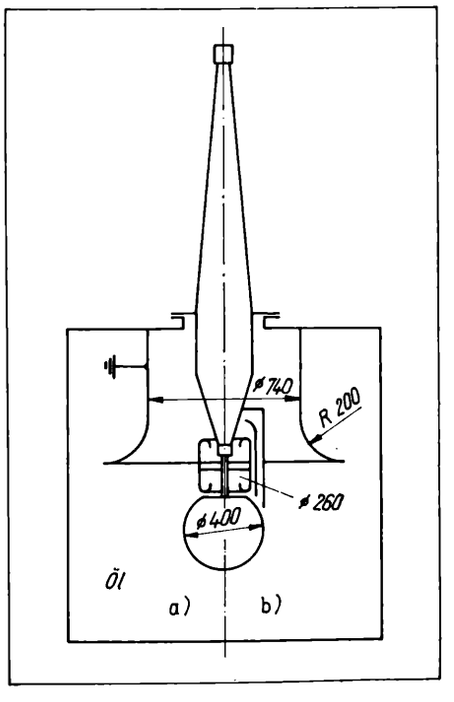
Im Special Report 12-00 wird die Frage nach Prüfmethoden für Transformatorendurchführungen aufgeworfen, die die Prüf- und Betriebsbedingungen der Durchführungen auf dem Transformator besser als die bisherigen berücksichtigen.

Der nachfolgende Beitrag befaßt sich mit einer speziellen Anordnung für die Stehspannungsprüfungen von 400-kV-Durchführungen und einer Anordnung für die Prüfung der thermischen Stabilität von Transformatorendurchführungen.

Es ist übliche Praxis, die Transformatorendurchführungen für die Stehspannungsprüfungen auf große Ölbehälter aufzusetzen. Dabei sind die Abstände zwischen dem ölseitigen Ende der Durchführungen und den Behälterwänden um ein Mehrfaches größer als diejenigen, die innerhalb eines Transformators realisiert werden können.

Dr.-Ing. *Joachim Schmidt* ist Leiter und Ing. *Karl Janke* Entwicklungsingenieur im Hochspannungslabor für Transformatoren des VEB Transformatorenwerkes „Karl Liebknecht".

**Bild 1.** Prüfanordnung für 400-kV-Transformatorendurchführungen
*a* ohne Barrierensystem
*b* mit Barrierensystem




Um realistischere Prüfbedingungen zu schaffen, wurden zunächst die Feldstärken längs der Ölteile von 400-kV-Durchführungen für verschiedene Einbausituationen im Transformator unter Berücksichtigung der möglichen, unterschiedlichen Wicklungsanordnungen berechnet und nach einer geometrisch einfachen Prüfanordnung gesucht, mit der die in den Transformatoren zu erwartenden Höchstwerte der Feldstärken an der Durchführung am besten angenähert werden können.

Diese Prüfanordnung (Bild 1) enthält eine geerdete Zylinderelektrode mit den im Bild angegebenen Abmessungen, die das Unterteil der Durchführung konzentrisch umschließt. In dieser Anordnung wurden Stehspannungsprüfungen mit 680 kV Wechselspannung unter gleichzeitiger Bestimmung der Teilentladungskenngrößen, Schaltspannungsprüfungen bis 1175 kV und Blitzspannungsprüfungen bis 1675 kV durchgeführt.

Die Ergebnisse der Teilentladungsmessungen weichen teilweise erheblich von denjenigen ab, die an gleichen Durchführungen in der traditionellen Prüfanordnung erzielt wurden, wobei die Positionierung und Dimensionierung der unteren Abschirmelektrode eine wichtige Rolle spielen.

Die Prüfanordnung nach Bild 1 ist Bestandteil des Pflichtenheftes für die Prüfanforderungen für 400-kV-Transformatorendurchführungen in der DDR. Ein Durchführungshersteller erfüllt diese Anforderungen ohne zusätzliches Barrierensystem an der unteren Abschirmelektrode (Bild 1a), andere Hersteller benutzen ein zusätzliches Barrierensystem (Bild 1b).

Seit Einführung dieser Prüfanordnung sind wir in der Lage, Teilentladungskenngrößen von Transformatoren auch bis zur Prüfwechselspannung hin zu garantieren.

Zur Überprüfung der thermischen Stabilität und der Überlastungsfähigkeit von Hartpapier-Durchführungen, die sich schon 5 bis 15 Jahre in Betrieb befinden, wurde die in Bild 2 gezeigte Prüfanordnung gebaut.

Zwei zu prüfende Durchführungen werden auf einen Ölbehälter montiert, wobei jeweils die luft- und ölseitigen Durchführungsanschlüsse durch Sammelschienen verbunden werden. Der Prüfstrom — normalerweise der Nennstrom $I_N$ der Durchführung — wird über einen Stromtransformator in der Schleife erzeugt, die Prüfspannung $U_t$ wird mit Hilfe eines Prüftransformators an die Stromschleife gelegt, und die Öltemperatur wird auf 90 °C eingeregelt, womit die Prüfbedingungen gemäß IEC 137 erfüllt sind. Eine der horizontal eingebauten Durchführungen erfüllte die erhöhten Stabilitäts-

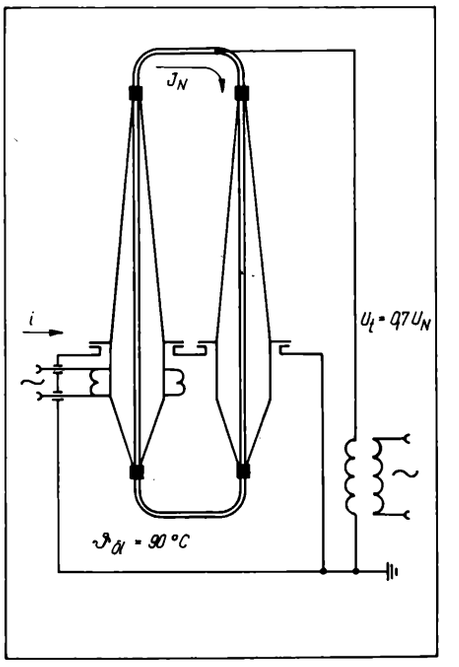


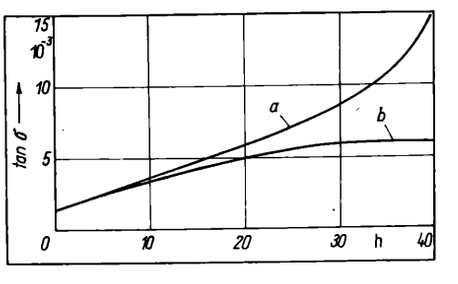

**Bild 2.** Anordnung zur Prüfung der thermischen Stabilität von Transformatorendurchführungen

forderungen nicht. Der Verlustfaktor dieser Durchführung (siehe Bild 3, Kurve *a*) zeigt eine bemerkenswert steigende Tendenz mit der Beanspruchungszeit.

Vergleichende Untersuchungen in einer Prüfanordnung, in der die Leiterverluste der Durchführung — wie nach IEC 137 zulässig — simuliert wurden, wiesen dagegen noch thermische Stabilität aus (siehe Kurve *b*). Die Nachbildung der Leiterverluste bei $I_N$ erfolgte durch eine im Inneren des Zentralrohres der Durchführung angeordnete Widerstandskette, die über einen speziellen Stromwandler gespeist wurde.

Wir vermuten, daß die unterschiedlichen Ergebnisse auf eine Veränderung der

**Bild 3.** Verlustfaktor einer 2500 A/245-kV-Durchführung während des Tests der thermischen Stabilität gemäß IEC 137
*a* in Prüfanordnung gemäß Bild 2
*b* mit simulierten Leiterverlusten



Wärmeübergangs- und Kühlungsbedingungen im Zentralrohr durch das Einbringen der Widerstandskette zurückzuführen ist.

Wir schlußfolgern daraus, daß der Nachweis der thermischen Stabilität von Transformatorendurchführungen nur an komplett armierten Durchführungen, d.h. mit stromtragendem Innenleiter erfolgen sollte und schlagen dafür eine Prüfanordnung nach Bild 2 vor. EA 1892

## Frequenzverhalten von Großtransformatoren bei periodischer Anregung mit Frequenzen bis zu 1 MHz

*J. Schmidt*, KDT; *H. Witt*, KDT; Berlin

*Diskussionsbeitrag im SC 12*

Der Beitrag bezieht sich auf die Frage 20 des Special Reports 12-00. Anhand eines Beispiels soll gezeigt werden, daß auch mit den Blitzspannungsberechnungsprogrammen wichtige qualitative Aufschlüsse über das Frequenzverhalten von Wicklungen bei periodischer Anregung, insbesondere für hohe Anregefrequenzen, erzielt werden können, sofern die Unterteilung des Transformatorenersatznetzwerkes genügend fein ist.

Eine aus 2 parallelen Zweigen mit je 570 Windungen und 30 Scheiben bestehende 220-kV-Wicklung wurde zur Berechnung der Blitzspannungsverteilung in 120 bzw. 240 Netzwerk-Elemente unterteilt. Die Berechnungsergebnisse zeigten, daß die Eigenvektoren monoton mit der Ordnungszahl abnahmen, außer denjenigen für die Ordnungszahl 29 und 52 [1]. In der Nähe des Hochspannungseinganges waren letztere relativ hoch und die räumliche Verteilung wich stark von der bekannten sinusoidalen Form ab.

Zur Überprüfung dieser Berechnungsergebnisse bauten wir eine Wicklung in Originalgröße, die wir mit den berechneten natürlichen Frequenzen erregten.

Einige Ergebnisse der dabei gemessenen räumlichen Spannungsverteilung zeigt Bild 1. Die Spannungsverteilung ist bei den natürlichen Frequenzen der niedrigen Ordnung sinusoidal mit $k$-Faktoren um 2 ··· 3. Bei der natürlichen Frequenz mit der Ordnungsnummer 29 hat sie dagegen nur im Bereich des Wicklungseinganges hohe Amplituden und steile Fronten, die hohe lokale Gradienten zwischen den Mitten der ersten und zweiten Scheibe erwarten lassen. Bild 2 zeigt die gemessene Spannungsdifferenz zwischen diesen Wicklungspunkten in Abhängigkeit von der anregenden Frequenz. Die hohen $q$-Faktoren bei 726 kHz (Ordnungsnummer 29) sagen aus, daß die Isolierung zwischen den Mitten der ersten und zweiten Scheibe bei periodischen Anregungen mit dieser Frequenz sehr hohen Spannungsbeanspruchungen ausgesetzt ist. Diese liegen weit über den Prüfbeanspruchungen dieser Isolierung. Es muß deshalb durch eine geeignete Anlagengestaltung dafür gesorgt werden, daß in diesem Frequenzbereich keine periodischen Anregungen auftreten können.

Dieses Beispiel sollte zeigen, daß man mit Hilfe moderner Computerprogramme durchaus in der Lage ist, die für einen Transformator bei periodischer Anregung besonders kritischen Frequenzen auch im Frequenzbereich von 0,25 ··· 1 MHz einzuschätzen, sofern nur eine genügend feine Unterteilung des Netzwerkes der Transformatorenwicklungen realisiert werden kann.

Dr.-Ing. *Joachim Schmidt* ist Leiter, Dr.-Ing. *Hans Witt* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Hochspannungslabors für Transformatoren des VEB Transformatorenwerkes „Karl Liebknecht".

**Literatur**

[1] *Witt, H.:* Die Berechnung der Blitzspannungsverteilung in Wicklungen von Grenzleistungstransformatoren mittels digitaler Rechenmaschinen. Diss. TU Dresden, 1981 EA 1893

## Zur Bestimmung der Lichtbogenparameter

*H. Hänisch*, KDT; *E. Anke*, KDT; Berlin

*Diskussionsbeitrag im SC 13*

Im Special-Report wurde die Frage gestellt, ob spezielle Prüfungen und Prüfschaltungen zur Bestimmung der Lichtbogenparameter $P$ und $\tau$ notwendig sind.

Da das verwendete Lichtbogenmodell für alle Strombereiche gelten soll, muß man die Frage prinzipiell mit nein beantworten. In den zeitlichen Verläufen des Lichtbogenstromes und der Lichtbogenspannung sind im Zusammenhang mit dem Stromkreis alle notwendigen Informationen enthalten. Es gibt aber Gründe, die die Gewinnung dieser Informationen aus den gewöhnlichen Strom-Nulldurchgangsoszillogrammen (SND) sehr erschweren:

- Die Zeitkonstante läßt sich nur aus der Abweichung der dynamischen von der statischen Strom-Spannungscharakteristik bestimmen. Diese Abweichung ist im allgemeinen sehr klein und nur bei hinreichend großen Werten für $di/dt$ nutzbar [1]. Die Messung muß mit großer Auflösung erfolgen; schon kleine Fehler, wie sie z.B. durch Verlagerung der Nullinie entstehen, verfälschen das Meßergebnis erheblich.
  Die notwendige rechentechnische Auswertung mit der dazu notwendigen Digitalisierung der Meßwerte ist erst nach dem Einsatz von Transientrecordern möglich geworden. Aber auch heute stellt die Bereitstellung von Strom-Spannungsmessungen im SND-Bereich, die für die Rechnerauswertung geeignet sind, ein Problem dar.
- Die Lichtbogenparameter sind über die nichtlineare Lichtbogengleichung und die Gleichungen des Prüfkreises miteinander verknüpft. Die Prüfkreisparameter müssen genau bekannt sein und der Typ der Approximationsfunktion von $P(g)$ und

Dr.-Ing. *Heinz Hänisch* ist Direktor, Dr.-Ing. *Ekkehard Anke* ist Abteilungsleiter im Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik" Berlin.

**Bild 1.** Räumliche Spannungsverteilung an einer 220-kV-Transformatorenwicklung bei periodischer Anregung mit den Eigenfrequenzen $f_\lambda$

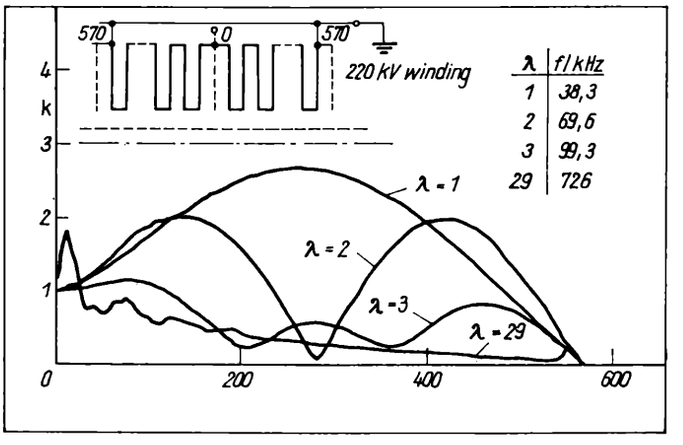
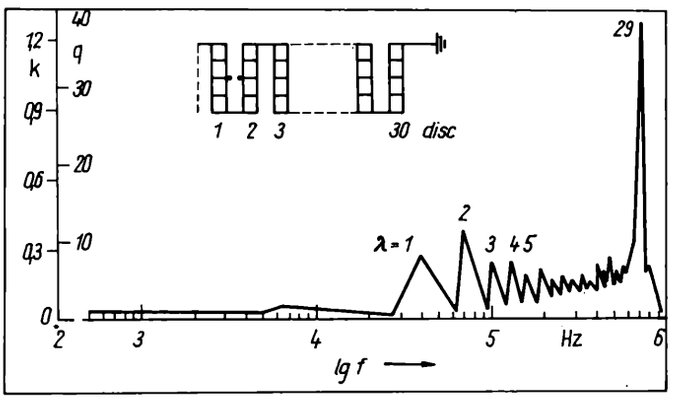



**Bild 2.** Frequenzgang der Amplituden der Spannungsdifferenz zwischen 1. und 2. Scheibe in Scheibenmitte bei eingeschwungener periodischer Anregung
$k$ bezogen auf die Amplitude der die Wicklung anregenden Spannung
$q$ bezogen auf die bei linearer Verteilung zwischen den Meßpunkten auftretende Spannung



$\tau$ ($g$) muß vorgegeben werden [2]. Auch dann ist ihre Bestimmung nur iterativ auf einem Großrechner möglich. Alle einfacheren Verfahren haben sich als so schlecht konvergierend erwiesen, daß sie für die praktische Anwendung nicht in Frage kommen.

Werden die Meßwerte aus SND-Messungen parallel zu ohnehin durchzuführenden Entwicklungsprüfungen gewonnen, stellen sie also eine zusätzliche Information aus den sehr teueren synthetischen Prüfungen dar, so muß man mit den genannten Schwierigkeiten fertig werden.

Für Untersuchungen im Labor ist es oft zweckmäßiger, eine spezielle Prüfschaltung aufzubauen und mit ihr die Lichtbogenparameter zu bestimmen. Beide Methoden haben also unterschiedliche Anwendungsfälle und auch unterschiedliche Vor- und Nachteile.

**Tafel 1. Methoden zur Bestimmung der Lichtbogenparameter**

**Vorteile und Nachteile**

**Parameteridentifikation** – Bestimmung der Lichtbogenparameter aus SND-Oszillogrammen zur Erweiterung der Aussage von Entwicklungsprüfungen

*Vorteile:*

- Erweiterung der Aussage normaler Prüfschichten, z. B. durch Umrechnung auf andere Spannungssteilheiten
- Messung bei Originalwert des Stromes
- Ermittlung der vorhandenen Statistik des Ausschaltvorganges

*Nachteile:*

- Vorgabe des Typs der funktionalen Abhängigkeit für $P$ ($g$) und $\tau$ ($g$)
- nur im Prüffeld möglich/zu teuer für eigenständige systematische Untersuchungen
- hoher Verschleiß der Versuchsmuster

**Modifiziertes Rijantoverfahren** – Bestimmung der Lichtbogenparameter aus der Antwort auf einen hochfrequenten Überlagerungsstrom

*Vorteile:*

- Kein Prüffeld notwendig, Aufbau der Anlage im Labor möglich
- Keine Vorgabe für die Funktionen $P$ ($g$) und $\tau$ ($g$)
- Hohe Steilheiten des Stromes und damit große Abweichungen von der statischen Kennlinie erreichbar
- Geringe Abnutzung der Versuchsapparatur, gute Konstanz der Versuchsbedingungen

*Nachteile:*

- Keine Nachbildung der Beeinflussung der Löschmittelströmung durch den Strom
- Spezielle Anlage notwendig

Beide Methoden werden auch in Zukunft nebeneinander bestehenbleiben.

## Literatur


[1] *Anke, E.; Mencke, H.:* Messung der Lichtbogenparameter $P$ und $\tau$ mit der Stromüberlagerungsmethode nach Rijanto. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau (1981) 6, S. 49 – 54

[2] *Mencke, H.; Schlundt, R.:* Bestimmung der Lichtbogenparameter mit der Methode der Parameteridentifikation. 28. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TH Ilmenau, 1983, Vortragsreihe A, Heft 1, S. 297 – 300


EA 1909

# ZEITSCHRIFTEN

## $SF_6$-Leistungsschalter

*Krikuncik, A. B.:* Energochosjaistvo sa rubeshom 1984, H. 5, S. 24 und 25

Fast alle bedeutenden Firmen haben in ihren Produktionsprogrammen $SF_6$-Leistungsschalter in dem Spannungsbereich von 110 bis 800 kV. Die $SF_6$-Leistungsschalter weisen eine Reihe von Vorteilen gegenüber den Druckluft- und Ölschaltern auf, z. B. beim Ausschalten naheliegender Kurzschlüsse und kleiner kapazitiver Ströme sowie im AWE-Zyklus (automatische Wiedereinstellung). Mit ihnen wird die gefürchtete Eisbildung an den Schaltern im Winter ausgeschlossen, und sie schalten leiser. Außerdem sind ihre Revisionszyklen größer.

Die leistungsstärksten $SF_6$-Schalter können bei Spannungen bis zu 550 kV Ströme bis zu 100 kA (Stoßstrom 250 kA) ausschalten. Es wird eine Kurzschluß-Abschaltzeit von 40 ms (zwei Perioden des 50 Hz-Wechselstromes) garantiert. Der Antrieb von $SF_6$-Schaltern erfolgt mit Druckluft, elektrohydraulisch und mit von Elektromotoren gespannten Federn.

Da sich das $SF_6$-Gas bei Temperaturen von $-30\,°C$ (0,5 MPa) verflüssigt, sind die $SF_6$-Schalter für rauhe klimatische Bedingungen in Freiluftanlagen nicht anwendbar.

Besondere Aufmerksamkeit widmet man der Erdbebenfestigkeit der Schalter, die auf Prüfständen getestet werden. Es sind folgende Revisionszyklen für $SF_6$-Schalter üblich: alle 1 bis 2 Jahre Funktionsprüfung, alle 6 bis 8 Jahre Durchsicht mit Korrosionsschutzmaßnahmen, alle 12 bis 16 Jahre oder nach 2000 Schaltungen auswechseln von Verschleißteilen. Die $SF_6$-Schalter sollen vorrangig für die zu erwartenden Ultrahochspannungsleitungen über 1000 kV Anwendung finden.

E. Broßmann, Berlin EA 1879

## Projekt der zweiten Gleichstromübertragung zwischen England und Frankreich

*Berkovskij, A. M.:* Energochosjaistvo sa rubeshom 1984, H. 5, S. 10 – 23

Das seit 1961 in Betrieb befindliche Gleichstromkabel zwischen England und Frankreich mit einer Spannung von 200 ($\pm$ 100) kV und einer Durchlaßfestigkeit von 160 MW hat sich bewährt; ist jedoch aus heutiger Sicht nicht mehr ausreichend. Eine starke Verbindung zwischen den englischen und französischen Elektroenergiesystemen würde die Ausnutzung des Zwischensystemeffektes gestatten. Die Spitzenzeiten sind im Sommer um eine Stunde und im Winter um zwei Stunden in beiden Systemen verschoben.

Da die zu verbindenden Elektroenergiesysteme nicht synchron arbeiten, und auch die Frequenz- und Spannungsregelungsstrategien unterschiedlich sind – also zu Instabilitäten führen würde – entschied man sich für eine zwar etwas teuere 500 ($\pm$ 250) kV Gleichstromdoppelleitung mit einer Gesamtdurchlaßfähigkeit von 2000 MW zur verglichenen 400-kV-Wechselstromleitung. Die erste Gleichstromleitung soll 1985 und die zweite 1986 in Betrieb gehen.

Es werden insgesamt 8 einphasige Kabel auf dem Meeresgrund verlegt. Dafür werden jeweils für zwei Kabel verschiedener Polarität von ferngesteuerten Unterwasserbaggern Gräben mit einer Tiefe von 1,5 m und einer Breite von 0,6 m ausgehoben.

Die Kabel in einem Graben haben eine unterschiedliche Polarität, um die Schiffskompasse nicht zu irritieren. Die Doppelleitung hat eine Länge von 72 km. Erstmalig werden an den Leitungsenden verschiedene Umformstationen eingesetzt.

Als ökonomische Vorteile dieser Leitung werden aufgeführt: Die Kosten der Leitung betragen nur ein Drittel der Kosten für die sonst übliche Installierung von Wärme- und Kernkraftwerksleistungen in beiden Ländern. In der Spitzenzeit erhält Frankreich von den englischen Kohlekraftwerken billigere Elektroenergie als von seinen Erdölkraftwerken. Am Tage erhält England billiger Grundlastenergie von den französischen Kern- und Wasserkraftwerken als von seinen Wärmekraftwerken. Außerdem benötigt England dringend 1500 MW Grundlastleistung, die es nur über diese Leitung bekommen kann. Die langen Bauzeiten von Kernkraftwerken verhindern eine schnelle Bereitstellung dieser Leistung in England. Die Baukosten der Gleichstromübertragung sollen innerhalb von 5 Jahren erwirtschaftet werden.

E. Broßmann, Berlin EA 1880

## Modernisierung von Kraftwerken in den USA

*Mamadov, O. M.; Stavrovskij, A. N.:* Energochosjaistvo sa rubeshom 1984, H. 5, S. 38 – 40

Im Vergleich zur Überführung in die Reserve mit geringer Einsatzdauer, Demontage oder Konservierung wird in den USA die Modernisierung und Rekonstruktion von älteren Kraftwerken aus ökonomischen Gesichtspunkten als besonders vorteilhaft angesehen. Mehr als 60% der heute installierten Kraftwerksleistung in den USA hat ein Alter von über 20 Jahren. Vieler jener Blöcke beteiligen sich an der Wirkleistungsregelung im Rahmen der Tagesganglinie.

Für die Modernisierung der Kraftwerke ist eine Vervollständigung des Anlagen- und Ersatzteilsortiments von der Herstellerindustrie notwendig. Die Gesamtkosten für die heute schon geplanten Rekonstruktionsmaßnahmen betragen 10 Milliarden Dollar. Es sollen nicht nur die Hauptanlagen selbst, wie Dampferzeuger, Überhitzer, Vorwärmer usw., modernisiert werden, sondern auch die Steuer- und Regelsysteme, die den heutigen Anforderungen der operativen Leistungsregelung angepaßt werden müssen. Die Projekte sehen den Austausch der bisherigen Regel- und Steuersysteme auf Analogbasis durch digitale Mikroprozessoren vor. Diese gewährleisten eine effektive automatische Leistungsregelung. Im Vergleich zum Ausgangszustand werden die ökonomischen Parameter der modernisierten Kraftwerke entschieden verbessert.

E. Broßmann, Berlin EA 1882

# BUCHER

## Grundkurs Mikroelektronik

Von *A. Möschwitzer*. Berlin: VEB Verlag Technik 1984. 160 Seiten, 134 Bilder, 24 Tafeln, Broschur. 16,50 Mark.
Bestell-Nr. 553 334 5

Die stürmische Entwicklung auf dem Gebiet der Mikroelektronik übt einen entscheidenden Einfluß auf die gesamte Volkswirtschaft aus. Das Buch gibt einen instruktiven Überblick über wichtige Grundlagen der Mikroelektronik, insbesondere im Hinblick auf den Schaltkreisentwurf. Die ist um so bedeutungsvoller, da gegenwärtig der Schaltkreisentwurf teilweise vom Schaltkreishersteller zum Anwender verlagert wird. Das Anliegen des Buches, durch die Vermittlung von Kenntnissen zur Realisierung elektronischer Funktionen mittels

- Standardschaltkreisen einschließlich der Mikrorechentechnik
- Kundenwunschschaltkreisen

die Entscheidungsfindung, Einsatzvorbereitung und den Einsatz bei den Anwendern zu unterstützen sowie allgemein interessierende Probleme dieses Gebietes für Elektroniker und Nichtelektroniker zu behandeln, wird erreicht. Hervorzuheben sind die an Beispielen orientierten Abhandlungen. Die Abschnitte zu Mikroprozessorsystemen und zu methodischen Fragen der Problemaufbereitung und -lösung runden trotz des geringen Umfangs die Darlegungen gut ab.
Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, daß das Buch eine solide Abhandlung zum Gebiet der Mikroelektronik darstellt.

K. Heß, Karl-Marx-Stadt EA 1914

## Industrierobotersteuerungen IRS 600 und IRS 650

**Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 210**

Von *W. Barth, J. Petermann, F. Reichel, J. Uhlig*. Berlin: VEB Verlag Technik 1984. 76 Seiten, 36 Bilder, 3 Tafeln, Broschur, 4,80 Mark.
Bestell-Nr. 553 349 2

Die Entwicklung der Industrierobotertechnik bestimmt in zunehmendem Maße den Charakter der Industrieproduktion technisch fortgeschrittener Länder. Das Niveau hängt maßgeblich vom Leistungsvermögen der zur Verfügung stehenden Steuerungstechnik ab. Aus dieser Sicht werden die vom VEB Numerik „Karl-Marx" produzierten mikroelektronischen Robotersteuerungen IRS 600 und IRS 650 in Aufbau und Betriebsweise vorgestellt. Es werden alle für den Anwender unmittelbar interessierenden Fragen behandelt. Das Anliegen, durch diese Kenntnisse bei dem betrieblichen Anwender die Entscheidungsfindung, Einsatzvorbereitung und Schulung der Kader zu unterstützen sowie allgemein interessierende Probleme der Robotersteuerungen zu behandeln, wird erreicht.
Der instruktive Überblick anhand der Abschnitte

- Grundlagen von Industrierobotersteuerungen
- Elemente von Industrierobotersteuerungen
- Industrierobotersteuerung IRS 600
- Industrierobotersteuerung IRS 650

regt darüber hinaus zum tieferen Eindringen in diese Thematik an.

K. Heß, Karl-Marx-Stadt EA 1915

## Höchstspannungsschaltgeräte (Spinaci přistroje velmi vysokého napéti)

Von *Z. Vostracky* u.a. (in tschechischer Sprache). Prag: Verlag SNTL. 1. Auflage 1983. 445 Seiten, 330 Bilder, 38 Tafeln. Leinen.

Das vorliegende Fachbuch behandelt den gesamten Problemkreis der Schaltgerätetechnik für Spannungen über 100 kV. Ausgehend von der Darstellung der verschiedenen Schaltvorgänge entsprechend den neuesten IEC-Publikationen, die ein Schalter zu beherrschen hat, werden die plasmatechnischen Vorgänge in Düsen von Druckgasschaltern zusammengestellt.
Dabei werden wesentliche plasmaphysikalische und hochspannungstechnische Größen sowohl von Druckluft wie auch von $SF_6$ angegeben, die für den Entwicklungsingenieur von HS-Schaltern stets von besonderem Wert sind. Auf der Basis dieser Grundlagen wird der Löschprozeß des Schaltlichtbogens in Druckgasschaltern mittels der Theorie von *Mayr/Cassie* erläutert.
Im weiteren werden die Kontaktprobleme behandelt. Neben den Grundgleichungen für die elektrodynamischen Kräfte, die die Belastung der Kontakte beschreiben, werden insbesondere die thermischen Vorgänge bei Dauerstrom unter Beachtung der Verhaltensweise der verschiedenen Konstruktionswerkstoffe beschrieben und durch umfangreiches experimentelles Material belegt. Großer Raum wird den Abbrandvorgängen an den Schaltkontakten von Leistungsschaltern eingeräumt. Auch hierzu sind alle wesentlichen thermischen, mechanischen und technologischen Eigenschaften der vielfältigen für die Anwendung interessierenden Abbrandmaterialien erläutert. Fügebeispiele von Sinterwerkstoffen mit den Standardwerkstoffen (Kupfer) werden gezeigt.
In dem Komplex der Konstruktionsgrundlagen sind auch die Dimensionierungskenngrößen für die Auslösemagneten und Antriebselemente sowie der Ventile einbezogen. Ergänzende Hinweise für die Bemessung der Porzellanisolatoren und der Füge- und Kittprobleme vervollständigen die technisch-technologischen Hinweise.
Im zweiten Teil werden die konstruktiven Besonderheiten der Leistungsschalter nach dem „ölarmen", „Druckluft-" und „$SF_6$"-Löschprinzip anhand vieler Prinzipdarstellungen und Fotos erläutert. Neben den äußeren Bauformen werden insbesondere die Löschkammern in Freiluftschaltern sowie in gekapselten Ausführungen im Detail beschrieben. Schnittbilder von $SF_6$-gekapselten Schaltanlagen für 110 kV und 420 kV zeigen die Kompaktheit derartiger Schaltanlagen.
In diesem Komplex werden auch eine Reihe bekannter Konstruktionsprinzipien von Hochspannungs-Trennern einschließlich Antriebstechnik dargelegt, sowie wesentliche technisch-technologische Details zu Porzellanen, Kontaktformen und Antriebselementen erläutert.
Im Abschlußkapitel wird die Prüftechnik der Hochspannungs-Schaltgeräte in ihrer Gesamtheit dargestellt. In Übereinstimmung mit den neuesten IEC-Publikationen sind die „mechanische Funktionstüchtigkeit", der Nachweis der Stromtragfähigkeit bei Nennstrom (Erwärmungsprüfung) und bei Kurzschlußstrom (thermisch-dynamische Prüfung), der Nachweis des Isoliervermögens und des Schaltvermögens einschließlich der dazu erforderlichen Prüfbedingungen und -ausrüstungen anhand umfangreichen Demonstrationsmaterials beschrieben.
Das vorliegende Buch gibt erstmals eine Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen und technologischen Grundlagen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure der Hochspannungsschaltgeräte.
Es dürfte infolge seines umfangreichen experimentellen Materials und der anwendungsreifen Darstellung dem Wissenschaftler in der Forschung oder in der Lehre an den Hochschulen ebenso Freude machen wie den Ingenieuren in der technischen Entwicklung und Fertigung.

O. Müller, Zittau EA 1918

## Einstieg in BASIC

Von *E. Kaucher, R. Klatte, Chr. Ullrich*. Reihe B. I.-Hochschultaschenbücher Band 618. Mannheim/Wien/Zürich: Bibliographisches Institut A. G. 1984. 244 Seiten, zahlr. Abbildungen. Broschur.

Das vorliegende Buch entstand aus langjährigen Erfahrungen in der Ausbildung im Programmieren und hat zum Ziel, dem Programmieranfänger bei den Verständnisschwierigkeiten, die in der abstrakten Vorgehensweise bei der Definition und Beschreibung von Programmiersprachen liegen, zu helfen.
Dies geschieht durch eine rund 50 Seiten umfassende Einleitung, in der der Leser mit ersten Programmierschritten, den Grundprinzipien des Programmierens und Fehlermöglichkeiten (Idealisierungsfehler, Verfahrens- und Entwurfsfehler, Schreib- und Gerätefehler, Semantik-, Interpretations-, Compiler-, Arithmetik-, Datenübertragungs- und Betriebssystemfehler u.a.) bekannt gemacht wird.
In den nächsten beiden Kapiteln werden die Grundlagen von Minimal-BASIC und das Minimal-BASIC-Programm, wie Grundsymbole, Namen, Standardtypen, Variable, Ausdrücke, Gestaltung und Kodierung von Programmen, Vereinbarungen von Variablen und Fehlern, Anweisungen und Formelfunktionen dargestellt.
Die folgenden 50 Seiten enthalten Übungsaufgaben und Spiele. Zu den 13 Aufgaben gehören u.a. Berechnung einer Quersumme, eine Meßwertüberprüfung, die Berechnung des größten und kleinsten Wertes, eine Polynomauswertung, das Ordnen eines Vektors, ein Anfangswertproblem, die Berechnung von Schwingkreisen, das Raten einer Zahlenreihe und ein Strategiespiel.
Syntaxdiagramme in Minimal-BASIC, ein Stichwortverzeichnis und die Erläuterung von BASIC-Dialekten (Versionen) von Rechnern verschiedener Hersteller vervollständigen den Inhalt des sehr instruktiven Taschenbuches.

W. Kolkwitz, Berlin EA 1917

Петцольд, Ф.; Кюллиг, П.: **О влиянии примесей на долгосрочную электрическую характеристику полиэтиленовых изоляций**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 85—88, 8 рис., 2 уравн., 16 лит.

Благодаря добавлению к полиэтилену стабилизирующих примесей, строгому контролю чистоты, надежным технологическим процессам, а также стабилизации электрических процессов старения добивается существенного улучшения устойчивости полиэтилена против образования каналов частичных электрических разрядов, определяющих в значительной мере срок службы кабелей с полиэтиленовой изоляцией.

---

Петцольд, Ф.; Шварц, Й.; Эберхардт, М.: **Влияние диффузии тиогексафторида на момент начала образования каналов частичных электрических разрядов в полиэтиленовых — и эпоксидных — изоляциях**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 88—89, 2 рис., 1 уравн., 7 лит.

Удалось доказать, что после диффузии тиогексафторида в модельных изоляциях из полиэтилена (без стабилизирующих напряжения примесей) и заполненной эпоксидной смолы, время до момента начала образования каналов частичных электрических разрядов отчасти существенно увеличивается. Считается необходимым проведение дальнейших исследований.

---

Ротхардт, Л.: **Простые инструкции по расчету электрической прочности горячих термически неоднородных газовых промежутков в тиогексафториде**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 90—91 2 рис., 6 уравн., 5 лит.

На основе значений прочности тиогексафторида и продуктов его диссоциации в термическом равновесии при повышенной температуре до значений свыше 3000 К даются простые инструкции по расчету электрической прочности промежутков горячего изоляционного газа и быстро изменяющихся промежутков коммутационного газа, которые разъясняются на примерах.

---

Рёнш, Х.; Баух, Х.: **Способ синтетического расчета продолжительности прерывания — функция распределения для потребителей в распределительных электроэнергетических сетях**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 92—96, 5 рис., 7 табл., 5 уравн., 7 лит.

Способ позволяет детально изучать влияние на надежность снабжения электроэнергией структуры сети, аппаратного оснащения его и режима эксплуатации в случае возникновения неисправности.

---

Винклер, Т.: **Расчет важных показателей надежности для передачи защитных сигналов сетей**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 96—100, 9 рис., 1 табл., 29 уравн., 2 лит.

Избыточные системы передачи с ненадежными каналами описываются однородными процессами Маркова. Путем рассмотрения продолжительности пребывания в подмножестве работоспособных состояний системы определяются стационарные и нестационарные показатели. Оценки возможны путем упрощающих допущений.

---

Хёне, Э.; Крамер, К.: **Влияние магнитных полей на стальные конструкции**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 101—104, 6 рис., 5 уравн., 4 лит.

На примере машинного распределительного устойства насосной гидроаккумулирующей электростанции Маркерсбах показывается, как можно определить модельными измерениями обогревание в стальных деталях, вызванные магнитными полями (потерями на пермагничивание и от вихревых токов, и индуктированными токами) и благодаря каким мерам обеспечивается снижение их. Полученные результаты сравниваются с измерениями, проведенными на смонтированной установке.

---

Ян, Д.; Вебер, Х.: **Конструкция аппаратуры передачи измерительных данных с двойной экранировкой путем модификации унифицированной системы, металлоконструкций (EGS)**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 104—106 6 рис., 7 лит.

Статья рассматривает вопросы мешающих влияний и их подавления в испытательной лаборатории больших мощностей. Основываясь на этом, обсуждаются два варианта конструктивного оформления аппаратуры по технике by-pa6.
В заключении более детально рассматривается реализованный на практике вариант.

---

Фишер, Ф.; Ретцлаф, В.: **Моделирование схем мощной электроники с помощью программируемых миниатюрных ЭВМ, часть 3**

ELEKTRIE, Берлин 39 (1985) 3, стр. 107—110, 2 рис., 4 табл., 7 уравн., 7 лит.

Программируемые карманные калькуляторы, бытовые и персональные компьютеры открывают новые возможности перед цифровым моделированием схем мощной электроники.
В третьей части статьи представляются диоды и тиристоры как модели ключей. Примеры программ на языке Бейзик относятся к схеме коммутирующей цепи, а также простого инвертора.



*Petzold, F.; Küllig, P.:* **To the Influence of Additions on the Electric Long-Time Behaviour of Polyethylene Insulations**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 85 – 88, 8 Figs., 2 Equations, 16 Refs.

By adding stabilizing additions to PE, accurate purity controls, safe technological processes, as well as stabilizing the electric aging processes a significant improvement of the resistance of the PE against the formation of electriction of electric TE-channels is reached, which are determitive to the electric life of PE-insulated cables.

---

*Petzold, F.; Schwarz, J.; Eberhardt, M.:* **Influence of the Diffusion of $SF_6$ on the Channel Application Time of Polyethylene and Epoxy Resin Model Insulations**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 88 – 89, 2 Figs., 1 Equation, 7 Refs.

It could be verified, that after diffusion of $SF_6$ into model insulations, existing of PE (without voltage stabilizing additions) and filled epoxy resin, considerable longer channel application times are occuring. Further fundamental studies appear as necessary.

---

*Rothhardt, L.:* **Simple Computing Instructions for the Dielectric Strength of Warm Thermally Inhomogeneous Gas Pathes in $SF_6$**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 90 – 91, 2 Figs., 6 Equations, 5 Refs.

Starting from strength values of $SF_6$ and its dissociation products in the thermal balance during increased temperature of over 3000 K simple computing instructions for the dielectric strength of warm insulating gas pathes and quickly changing switching gas pathes are derived. They are illustrated by examples.

---

*Rönsch, H.; Bauch, H.:* **A Method of Synthetic Computation of the Break Time-Distribution Function for Gonsumers in Distributing Networks of Electric Power**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 92 – 96, 5 Figs., 7 Tables, 5 Equations, 7 Refs.

The Method allows the detailed study of the influence of the network structure, device-technical equipment and operating management in the disturbing case on the supply reliability.

---

*Winkler, Th.:* **Computation of Relevant Reliability Characteristics for the Transmission of Network Protecting Signals**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 96 – 100, 9 Figs., 1 Table, 29 Equations, 2 Refs

Redundant transmission systems with unreliable channels are described through homogeneous Markov-processes. About the consideration of the hold-up time in the partial quantity of the functionable system states stationary and instationary characteristics are determined. Calculations are possible through simplifing assumptions.

---

*Höhne, E.; Kramer, K.:* **The Influence of Magnetic Fields on Steel Constructions**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 101 – 104, 6 Figs., 5 Equations, 4 Refs.

By example of the machine switching plant of the pumped-storage power station of Markersbach it is pointed out, how the warmings in the steel elements, caused by the magnetic fields (remagnetization and eddy-current losses and induction curreuts), may be determined by model measurements and what kind of measures are possible, adapted to the decrease of them. The results are compared with the measurements, made by the equiped plant.

---

*Jahn, D.; Weber, H.:* **Double-Shielded Construction of a Data Transmission Equipment through Modifiing the Standard Vessel System (EGS)**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 104 – 106, 6 Figs., 7 Refs.

In this contribution the disturbance influencing and its elimination in the high-power test laboratory is dealt with. Basing upon those studies two variants of the constructive designing of devices in the by-path techniques are discussed. As a result the realized variant is illustrated more fully.

---

*Fischer, F.; Retzlaff, W.:* **Simulation of Circuits of the Powerelectronics by Means of Programmable Microcomputers, Part 3**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, pp. 107 – 110, 2 Figs., 7 Equations, 4 Tables, 7 Refs.

Programmable calculators as well as home and personnel computers are offering new possibilities of the digital simulation of powerelectronic circuits. In the third part of this contribution diodes and thyristors as switcher models are illustrated. BASIC-programme examples are related to the circuiting of a commutating circuit as well as of a simple inverter.

# ELEKTRIE

*Petzold, F.; Küllig, P.:* **Zum Einfluß von Zusätzen auf das elektrische Langzeitverhalten von Polyethylen-Isolierungen**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 85 – 88, 8 Bilder, 2 Gln., 16 Lit.

Durch die Beimengung von stabilisierenden Zusätzen zum PE, strenge Reinheitskontrollen, sichere technologische Prozesse sowie Stabilisierung der elektrischen Alterungsvorgänge wird eine signifikante Verbesserung der Beständigkeit des PE gegen die Ausbildung von elektrischen TE-Kanälen, die bestimmend für die elektrische Lebensdauer PE-isolierter Kabel sind, erreicht.

---

*Petzold, F.; Schwarz, J.; Eberhardt, M.:* **Einfluß der Diffusion von $SF_6$ auf die Kanaleinsatzzeit von Polyethylen- und Epoxidharz-Modellisolierungen**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 88 – 89, 2 Bilder, 1 Gl. 7 Lit.

Es konnte nachgewiesen werden, daß nach Diffusion von $SF_6$ in Modellisolierungen aus PE (ohne spannungsstabilisierende Zusätze) und gefülltem Epoxidharz zum Teil erheblich längere Kanaleinsatzzeiten auftreten. Weitere Grundlagenuntersuchungen erscheinen erforderlich.

---

*Rothhardt, L.:* **Rechenvorschriften für die elektrische Festigkeit heißer thermisch inhomogener Gasstrecken in $SF_6$**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 90 – 91, 2 Bilder, 6 Gln., 5 Lit.

Ausgehend von Festigkeitswerten von $SF_6$ und seinen Dissoziationsprodukten im thermischen Gleichgewicht bei erhöhter Temperatur bis über 3000 K werden einfache Rechenvorschriften für die elektrische Festigkeit heißer Isoliergasstrecken und schnell veränderlicher Schaltgasstrecken hergeleitet und an Beispielen verdeutlicht.

---

*Rönsch, H.; Bauch, H.:* **Berechnung der Unterbrechungsdauer-Verteilungsfunktion für Abnehmer in Elektroenergie-Verteilungsnetzen**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 92 – 96, 5 Bilder, 7 Tafeln, 5 Gln., 7 Lit.

Das Verfahren gestattet im Störungsfall die detaillierte Untersuchung des Einflusses der Netzstruktur, gerätetechnischen Ausstattung und Betriebsführung im Störungsfall auf die Versorgungszuverlässigkeit.

---

*Winkler, Th.:* **Berechnung relevanter Zuverlässigkeitskenngrößen für die Übertragung von Netzschutzsignalen**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 96 – 100, 9 Bilder, 1 Tafel, 29 Gln., 2 Lit.

Redundante Übertragungssysteme mit unzuverlässigen Kanälen werden durch homogene Markov-Prozesse beschrieben. Über die Betrachtung der Verweildauer in der Teilmenge der funktionsfähigen Systemzustände werden stationäre und instationäre Kenngrößen ermittelt. Abschätzungen sind durch vereinfachende Annahmen möglich.

---

*Höhne, E.; Kramer, K.:* **Einfluß magnetischer Felder auf Stahlkonstruktionen**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 101 – 104, 6 Bilder, 5 Gln., 4 Lit.

Am Beispiel der Maschinenschaltanlage des Pumpspeicherwerkes Markersbach wird aufgezeigt, wie die Erwärmungen in den Stahlteilen durch die magnetischen Felder (Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste und Induktionsströme) durch Modellmessungen bestimmt werden können und welche Maßnahmen zu deren Verringerung möglich sind. Die Ergebnisse werden mit den Messungen an der ausgeführten Anlage verglichen.

---

*Jahn, D.; Weber, H.:* **Doppeltgeschirmter Aufbau einer Meßwertübertragungseinrichtung durch Modifizierung des EGS-Systems**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 104 – 106, 6 Bilder, 7 Lit.

Im Beitrag wird auf die Störbeeinflussung und ihre Unterdrückung im Hochleistungsprüffeld eingegangen. Darauf aufbauend werden zwei Varianten zur konstruktiven Gestaltung von Geräten in Bypaß-Technik diskutiert. Die realisierte Variante wird näher erläutert.

---

*Fischer, F.; Retzlaff, W.:* **Simulation von Schaltungen der Leistungselektronik mit Hilfe programmierbarer Kleinstrechner, Teil 3**

ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 3, S. 107 – 110, 2 Bilder, 4 Tafeln, 7 Gln., 7 Lit.

Programmierbare Taschenrechner, Heim- und Personalcomputer eröffnen der digitalen Simulation leistungselektronischer Schaltungen neue Möglichkeiten. Im dritten Teil des Beitrages werden Dioden und Thyristoren als Schaltermodell dargestellt. BASIC-Programmbeispiele beziehen sich auf die Schaltung eines Kommutierungskreises sowie eines einfachen Wechselrichters.


| | |
|---|---|
| Herausgeber | Kammer der Technik |
| Verlag | VEB Verlag Technik<br>DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201<br>Telegrammadresse: Technikverlag Berlin<br>Telefon: 28700; Telex: 011 22 28 techn dd |
| Verlagsdirektor | Dipl. oec. *Herbert Sandig* |
| Redaktion | Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 28703 45)<br>Dipl.-Ing. *Wolfgang Rönspieß*, Redakteur (Telefon: 28703 43) |
| Gestalter | *Ursula Maria Lange* (Telefon: 28 70 28 7 |
| Lizenz-Nr. | 1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik |
| AN (EDV) | 6730 |
| Erscheinungsweise | monatlich 1 Heft |
| Heftpreis | 2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen. |
| Gesamtherstellung | III/18/328 Messedruck Leipzig, BT Borsdorf 7122 Borsdorf |
| Anzeigenannahme | Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, 1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201<br>Anzeigenpreisliste Nr. 7<br>Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, DDR-1157, Berlin, Hermann-Duncker-Str. 89 |
| Erfüllungsort und Gerichtsstand | Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig. |
| Bezugsmöglichkeiten | |
| DDR | sämtliche Postämter |
| SVR Albanien | Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana |
| VR Bulgarien | Direkzia R. E. P., 11 a, Rue Paris, Sofia |
| VR China | China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing |
| ČSSR | PNS – Ústrédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Vinohardská 41, 125 05 Praha<br>PNS, Ústred na Expedicia Tiače, Gottwaldovo nám. 48, 88 419 Bratislava |
| SFR Jugoslawien | Jugoslovenska Knijiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knijižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb |
| Koreanische DVR | CHULPANMUL Korea Publictions Export & Import Corporation, Pyongyang |
| Republik Kuba | Empresa de Comercio, Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407,, Ciudad Habana |
| VR Polen | C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa |
| SR Rumänien | Directia Generala a Postei si Difuzarii Presei, Palatul Administrativ, Bucuresti |
| UdSSR | Städtische Abteilung von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore |
| Ungarische VR | P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Ostzály, P. O. Box 16, 1426 Budapest |
| SR Vietnam | XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hanoi |
| BRD und Berlin (West) | ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141 – 167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30 |
| Österreich | Helios Literatur-Vertriebs GmbH & Co, KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge |
| Schweiz | Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich |
| Alle anderen Länder | örtlicher Fachbuchhandel<br>BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160; und Leipzig Book Service DDR-7010 Leipzig, Talstraße 29 |

# Zuverlässiger Handelspartner aus Bulgarien

Electroimpex

Halle 17

ISSN 0013 — 5399
ELEKTRIE · Berlin 39 (1985) 3 · S. 81 — 120

6730 3 177 027 465
KOMB KERAN WERKE
8612 7001 0936 PF